

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAILSON ROIK

BIOMASSA AÉREA E CARBONO ORGÂNICO EM ÁRVORES NATIVAS DE  
*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

CURITIBA

2018

MAILSON ROIK

BIOMASSA AÉREA E CARBONO ORGÂNICO EM ÁRVORES NATIVAS DE  
*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

CURITIBA

2018

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Roik, Mailson

Biomassa aérea e carbono orgânico em árvores nativas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze / Mailson Roik. – Curitiba, 2018.  
148 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientadores: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 19/03/2018.

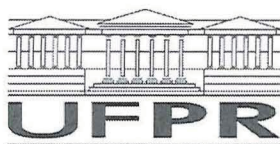
Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Biomassa vegetal. 2. Carbono. 3. Pinheiro-do-paraná. 4. Florestas – Métodos estatísticos. 5. Teses. I. Machado, Sebastião do Amaral. II. Figueiredo Filho, Afonso. III. Sanquetta, Carlos Roberto. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.548

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MAILSON ROIK** intitulada: **BIOMASSA AÉREA E CARBONO ORGÂNICO EM ÁRVORES NATIVAS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 19 de Março de 2018.

SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO  
Presidente da Banca Examinadora

THIAGO FLORIANI STEPKA  
Avaliador Externo

NELSON CARLOS ROSOT  
Avaliador Interno

LUIZ MARCELO BRUM ROSSI  
Avaliador Externo

FABIANE APARECIDA RETSLAFF GUIMARÃES  
Avaliador Externo



À minha filha Letícia Mayana Roik  
*“o amor maior que possa existir”*

## AGRADECIMENTOS

À minha família que incentivou minha formação e possibilitou a concretização de mais um objetivo.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado*, pelo total apoio e contribuições valiosas ao desenvolvimento deste trabalho e pela confiança a mim depositada ao aceitar-me como orientado.

Ao meu coorientador e amigo, *Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho*, pelas valiosas contribuições e sugestões a este trabalho, pela paciência e compreensão desde a graduação, pelas inúmeras oportunidades proporcionadas e pelo exemplo de pessoa e profissional, que certamente muito contribuiu para minha formação profissional e pessoal.

Ao meu coorientador, *Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta*, por todas as sugestões e contribuições a este trabalho.

Ao amigo e professor, *Dr. Alexandre Behling*, por toda a ajuda na reta final do doutorado e pelas inúmeras palavras de incentivo e apoio.

Aos professores *Ana Paula Dalla Corte, Carlos Velloso Roderjan, Franklin Galvão, Henrique Soares Koehler, Julio Eduardo Arce, Luciano Farinha Watzlawick, Sylvio Péllico Netto e Yoshiko Saito Kuniyoshi* pelo exemplo de dedicação à ciência florestal, pelos ensinamentos e lições que certamente levarei para o resto da vida.

A todos os envolvidos no desenvolvimento e execução do Projeto “*Estratégias para o manejo florestal sustentável em pequenas propriedades rurais no Centro-Sul do Paraná, Brasil*”, que possibilitaram a realização desse estudo.

Aos amigos *Dr. Rodrigo Geroni Mendes do Nascimento* e *Dr. Rodrigo Otávio Veiga de Miranda*, pelo cafezinho diário e onde muitas ideias e discussões construtivas surgiram.

Ao amigo *Dr. Marcelo Roveda*, pelo apoio sempre que necessário.

À *Universidade Federal do Paraná* e ao *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal* pela honra de estudar na instituição de ensino florestal mais antiga do país e que tantas conquistas proporcionou à ciência florestal no Brasil.

À *Universidade Estadual do Centro-Oeste*, por disponibilizar a estrutura e condições necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa.

.

À *CAPES* pela bolsa de estudos.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e contribuições.

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

A todos, minha gratidão!

*“A solução para a conservação das florestas não está no desenvolvimento de pesquisas ou na comprovação de novas teorias. Ela passa pela compreensão da sua fundamental importância e pela mudança da mentalidade humana.”*

**O autor**



## RESUMO

O objetivo do trabalho foi quantificar a biomassa vegetal aérea e o carbono orgânico em árvores nativas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. e avaliar aspectos relacionados à modelagem da biomassa, além de comparar as estimativas de biomassa aérea total obtidas por diferentes metodologias. O trabalho foi realizado em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana localizado no município de Fernandes Pinheiro, Paraná. A biomassa aérea foi quantificada pelo método direto, pela amostragem de 29 árvores com DAP  $\geq 40$  cm. Foram ajustados modelos tradicionais da literatura que apresentam como variáveis independentes o diâmetro e a altura e/ou uma variação destes. Para avaliar os efeitos das variáveis morfológicas, qualitativas e a idade das árvores na modelagem foram desenvolvidas equações pelo procedimento *stepwise*. A modelagem da biomassa foi realizada por duas diferentes técnicas, (i) ajuste independente, que desconsidera o princípio da aditividade; (ii) ajuste simultâneo, o qual considera o princípio da aditividade. Avaliaram-se as estimativas de biomassa aérea obtidas por três diferentes abordagens: (i) sistemas de equações alométricas tradicionais e obtidas pelo procedimento *stepwise*; (ii) fatores de expansão de biomassa, considerando diferentes abordagens para a obtenção da variável biomassa do fuste e (iii) fatores de expansão e conversão de biomassa, considerando diferentes abordagens para a obtenção da variável volume do fuste. A média da produção individual de biomassa aérea e carbono orgânico foi de 2126,5 kg.ind<sup>-1</sup> e 935,8 kg.ind<sup>-1</sup>, respectivamente. Os modelos tradicionais e *stepwise* apresentaram estatísticas de ajustes satisfatórias aos dados do estudo. A abordagem simultânea não resultou em expressivas mudanças nas estatísticas de ajuste das equações quando comparada à abordagem independente, todavia tem como vantagem a garantia da aditividade, menores intervalos de confiança dos coeficientes e, consequentemente, estimadores mais eficientes, sendo esta a abordagem mais adequada para a estimativa da biomassa total e dos respectivos componentes. Em relação às diferentes metodologias avaliadas para estimar a biomassa aérea total, as abordagens que consideram os sistemas de equações alométricas apresentaram resultados interessantes, tanto do ponto de vista da precisão das estimativas quanto da sua aplicabilidade. A abordagem considerando a variável volume cubado apresentou bons resultados, todavia, a mesma deve ser aplicada associando-a ao fator de expansão e conversão específico, sendo que o produto entre o volume do fuste e a densidade média da espécie não pode ser considerada como variável correspondente à biomassa do fuste. A abordagem correspondente à estimativa do volume do fuste não se configurou em um bom estimador da biomassa aérea total, apresentando o pior desempenho entre as abordagens avaliadas.

**Palavras-chave:** aditividade; fatores de biomassa; modelagem independente; modelagem simultânea.

## ABSTRACT

The aims of this work were to quantify total aboveground biomass and organic carbon in native trees of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. and to evaluate aspects related to biomass modeling, in addition to comparing the estimates of total aboveground biomass obtained by different methodologies. The work was carried out in a fragment of Mixed Ombrophilous Forest located in Fernandes Pinheiro, Paraná. The aboveground biomass was quantified by the direct method, by sampling 29 trees with DBH  $\geq 40$  cm. Traditional models of the literature that have as independent variables the diameter and height or a variation of these were adjusted. To evaluate the effects of the morphometric and qualitative variables and the age of the trees in the modeling, equations were developed by the *stepwise* procedure. The biomass modeling was performed by two different techniques, (i) independent adjustment, which does not consider the additivity principle; (ii) simultaneous adjustment, which considers the additivity principle. The aboveground biomass estimates obtained by three different approaches were evaluated: (i) systems of traditional equations obtained by the *stepwise* procedure; (ii) biomass expansion factors, considering different approaches to obtain the variable biomass of the stem and (iii) biomass expansion and conversion factors, considering different approaches to obtain the variable stem volume. The average individual production of aboveground biomass and organic carbon was 2126.5 kg.ind<sup>-1</sup> and 935.8 kg.ind<sup>-1</sup>, respectively. The traditional and *stepwise* models presented satisfactory adjustment statistics to the study data. The simultaneous approach did not result in significant changes in the equation adjustment statistics when compared to the independent approach, but has the advantage of additivity, lower confidence intervals of the coefficients and, consequently, more efficient estimators, being this the most appropriate approach for estimating of the total biomass and its components. In relation to the different methodologies evaluated to estimate aboveground biomass, the approaches that consider the allometric equation systems presented interesting results, both from the point of view of the accuracy of the estimates and their applicability. The approach considering the variable cubed volume presented good results, however, it should be applied by associating it with the specific BCEF, and the product between the stem volume and the average density of the species should not be considered as a variable corresponding to the stem biomass. The approach corresponding to the estimate of the stem volume did not constitute a good estimator of the aboveground biomass, presenting the worst performance among the evaluated approaches.

**Keywords:** additivity; biomass factors; independent modeling; simultaneous modeling.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	44
FIGURA 2 – IDADE, VOLUME E BIOMASSA INDIVIDUAL TOTAL E POR COMPONENTE DE <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze.....	55

### CAPÍTULO 2

FIGURA 3 – ÍNDICES MORFOMÉTRICOS AVALIADOS. ....	72
FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DA POSIÇÃO DA COPA (a) E FORMA DA COPA (b) PROPOSTA POR Dawkins (ADAPTADO DE Dawkins, 1958). ....	73
FIGURA 5 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS TRADICIONAIS E <i>STEPWISE</i> PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA TOTAL E RESPECTIVOS COMPONENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i> , OBTIDOS PELOS AJUSTES INDEPENDENTE (I) E SIMULTÂNEO (S). ....	84

### CAPÍTULO 3

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS DIFERENTES ABORDAGENS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA DE <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	113
FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS REFERENTES ÀS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA AÉREA CONSIDERANDO (BEF = 1,3372) E DIFERENTES ABORDAGENS DAS VARIÁVEIS BIOMASSA E VOLUME DO FUSTE.....	115

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

TABELA 1 – VOLUME, IDADE E NÚMERO DE INDIVÍDUOS AMOSTRADOS DA ESPÉCIE <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze.....	46
TABELA 2 – VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DE BIOMASSA SECA DE <i>Araucaria angustifolia</i> POR CLASSE DE DAP, PARA CADA COMPONENTE AVALIADO E PARA O TOTAL.....	50
TABELA 3 – VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DE CARBONO ORGÂNICO DE <i>Araucaria angustifolia</i> POR CLASSE DE DAP, PARA CADA COMPONENTE AVALIADO E PARA O TOTAL.....	51
TABELA 4 – TEORES DE CARBONO E UMIDADE DE <i>Araucaria angustifolia</i> , POR CLASSE DE DAP, PARA CADA COMPONENTE AVALIADO.....	53

### CAPÍTULO 2

TABELA 5 – MODELOS TRADICIONAIS AVALIADOS.....	71
TABELA 6 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS OBTIDOS PELO AJUSTAMENTO INDEPENDENTE PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	78
TABELA 7 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO INDEPENDENTE DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i> .....	79
TABELA 8 – CLASSIFICAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS TRADICIONAIS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i> .....	80
TABELA 9 – MODELOS OBTIDOS PELO PROCEDIMENTO <i>STEPWISE</i> PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i> .....	81
TABELA 10 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS E <i>STEPWISE</i> COM MELHOR DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA TOTAL E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i> , OBTIDOS PELOS AJUSTES INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO.....	82
TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS E <i>STEPWISE</i> COM MELHOR DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA TOTAL E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE <i>Araucaria angustifolia</i> , OBTIDAS PELOS AJUSTES INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO.....	83
TABELA 12 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SELECIONADAS E A BIOMASSA DOS RESPECTIVOS COMPONENTES AVALIADOS.....	85
TABELA 13 – EFEITOS DIRETOS (DIAGONAL, EM NEGRITO) E INDIRETOS, CORRELAÇÃO (r) E RAZÃO ENTRE OS EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A BIOMASSA DO LENHO DO FUSTE.....	87
TABELA 14 – EFEITOS DIRETOS (DIAGONAL, EM NEGRITO) E INDIRETOS, CORRELAÇÃO (r) E RAZÃO ENTRE OS EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A BIOMASSA DOS GALHOS.....	87
TABELA 15 – EFEITOS DIRETOS (DIAGONAL, EM NEGRITO) E INDIRETOS, CORRELAÇÃO (r) E RAZÃO ENTRE OS EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A BIOMASSA AÉREA TOTAL.....	87

### **CAPÍTULO 3**

TABELA 16 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS DIFERENTES ABORDAGENS EMPREGADAS PARA ESTIMAR A BIOMASSA AÉREA TOTAL DE *Araucaria angustifolia*. . 112

TABELA 17 – RANQUEAMENTO DAS ABORDAGENS AVALIADAS PARA ESTIMAR A BIOMASSA AÉREA TOTAL..... 112

TABELA 18 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO REFERENTES ÀS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA AÉREA CONSIDERANDO (FEB = 1,3372) E DIFERENTES ABORDAGENS DAS VARIÁVEIS BIOMASSA E VOLUME DO FUSTE..... 114

TABELA 19 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO CORRESPONDENTES À VARIÁVEL BIOMASSA DO FUSTE E ESTIMATIVAS CORRESPONDENTES. .... 116

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 – DISPERSÃO DE RESÍDUOS DOS MODELOS TRADICIONAIS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA DOS COMPONENTES E BIOMASSA AÉREA TOTAL DE <i>Araucaria angustifolia</i> .....	148
---	-----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	20
2.1 <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze .....	20
2.2 ECOSSISTEMAS FLORESTAIS E O ESTOQUE DE CARBONO .....	23
2.3 BIOMASSA.....	25
2.4 DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DE BIOMASSA .....	27
2.4.1 Métodos diretos .....	27
2.4.2 Métodos indiretos .....	28
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	30

### CAPÍTULO 1

<b>QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA E DO CARBONO ORGÂNICO EM ÁRVORES NATIVAS DE <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze</b> .....	38
<b>RESUMO</b> .....	38
<b>ABSTRACT</b> .....	39
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	40
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	43
2.1 OBJETIVO GERAL .....	43
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	43
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	44
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	50
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	57
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58

### CAPÍTULO 2

<b>MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA DE ÁRVORES NATIVAS DE <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze</b> .....	63
<b>RESUMO</b> .....	63
<b>ABSTRACT</b> .....	64

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	65
<b>2 OBJETIVOS</b>	69
2.1 OBJETIVO GERAL	69
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	69
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	70
3.1 ORIGEM DOS DADOS, ÁREA DE ESTUDO E QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA	70
3.2 MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA	70
3.2.1 Modelos tradicionais	70
3.2.2 Equações desenvolvidas pelo procedimento <i>stepwise</i>	71
3.3 AJUSTE INDEPENDENTE	74
3.4 AJUSTE SIMULTÂNEO	74
3.5 ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO	75
<b>4 RESULTADOS</b>	78
<b>5 DISCUSSÃO</b>	86
<b>6 CONCLUSÕES</b>	91
<b>REFERÊNCIAS</b>	92

### CAPÍTULO 3

#### AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS EMPREGADAS NA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.)

Kuntze ..... 98

**RESUMO**..... 98

**ABSTRACT**..... 99

**1 INTRODUÇÃO** ..... 100

**2 OBJETIVOS**..... 103

2.1 OBJETIVO GERAL ..... 103

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 103

**3 MATERIAIS E MÉTODOS** ..... 104

3.1 ORIGEM DOS DADOS, ÁREA DE ESTUDO E QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA ..... 104

3.2 EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS USADAS PARA ESTIMAR A BIOMASSA AÉREA TOTAL..... 104

3.2.1 Sistema com equações tradicionais ..... 104



3.2.2 Sistema com equações <i>stepwise</i> .....	105
3.3 FATORES DE EXPANSÃO DE BIOMASSA (FEBs) .....	106
3.4 FATORES DE EXPANSÃO E CONVERSÃO DE BIOMASSA (BCEFs) ..	106
3.5 AVALIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA AÉREA TOTAL .....	108
<b>4 RESULTADOS</b> .....	112
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	117
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	120
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b> .....	121
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	122
<b>REFERÊNCIAS GERAIS</b> .....	128
<b>APÊNDICE</b> .....	148

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A araucária é uma espécie característica da Floresta Ombrófila Mista e tem reconhecida importância na região Sul do Brasil. A espécie foi, durante anos, extensivamente explorada, de modo que na década de 1980 suas reservas naturais foram reduzidas consideravelmente. Atualmente está enquadrada na categoria “em perigo” na Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção, conforme Portaria MMA nº 443, de 17 de dezembro de 2014 (BRASIL, 2014), devido à intensa exploração de sua madeira, ao grande consumo de suas sementes e a ineficácia das leis que visam sua conservação.

Grande parte dos remanescentes da Floresta com Araucária está localizada em propriedades privadas, sendo que tal vegetação não pode ser manejada por força da legislação atual e, portanto, não agrega rendimento direto aos proprietários, além de diminuir a área potencial de cultivo. Essa restrição da lei que objetiva preservar tem tido na verdade, um efeito contrário, constatando-se um avanço paulatino e permanente sobre a floresta e, a conversão desta, em culturas agrícolas e/ou áreas de pastagens.

Nesse sentido, alternativas para a conservação da araucária e dos remanescentes florestais devem ser desenvolvidas de modo que possam fomentar a conservação ambiental e o desenvolvimento sustentável, como é o caso de projetos que visam o pagamento por serviços ambientais. A capacidade das florestas de absorver carbono do dióxido de carbono atmosférico está entre os serviços que regulam as condições ambientais. Diante disso, tem crescido o interesse a respeito da quantificação da biomassa florestal, principalmente pelo potencial de armazenamento do carbono atmosférico nas florestas, diante do crescimento das emissões em todo mundo e ao cenário de mudanças climáticas.

Diante do exposto o objetivo do trabalho foi quantificar a biomassa aérea total e o carbono orgânico em árvores nativas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. e avaliar aspectos relacionados à modelagem da biomassa, além de comparar as estimativas de biomassa aérea total obtidas por diferentes metodologias. Para isso a pesquisa foi estruturada em três capítulos.

O capítulo I intitulado “QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA E DO CARBONO ORGÂNICO EM ÁRVORES NATIVAS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze” versa sobre a determinação da biomassa aérea e do carbono orgânico totais e dos respectivos componentes, abordando toda a metodologia empregada na quantificação, sendo a base utilizada em toda a pesquisa.

No capítulo II, intitulado “MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA DE ÁRVORES NATIVAS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze” é realizada uma análise das modelagens independente e simultânea, metodologias aplicadas na estimativa da biomassa aérea e dos respectivos componentes, cuja principal diferença correspondente à garantia da aditividade, onde o somatório das estimativas de biomassa de cada componente deve resultar na mesma estimativa obtida pela regressão de biomassa total. Nesse capítulo avaliou-se ainda, o efeito de variáveis morfométricas, qualitativas e a idade das árvores, além do diâmetro à altura do peito e altura total na estimativa da biomassa.

No capítulo III analisou-se as estimativas de biomassa aérea total obtidas por três diferentes abordagens: (i) sistemas de equações alométricas tradicionais e obtidas pelo procedimento *stepwise*; (ii) fatores de expansão de biomassa e (iii) fatores de expansão e conversão de biomassa. Considerou-se também nesse estudo, diferentes abordagens para a obtenção das variáveis biomassa do fuste e volume do fuste, bem como suas implicações na estimativa da biomassa aérea total.

Ao final da tese, são apresentadas considerações gerais sobre a pesquisa, bem como recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

O gênero *Araucaria* fazia parte da flora terrestre já no período Triássico e teve seu predomínio no Gondwana. Atualmente o gênero encontra-se distribuído no hemisfério sul, onde 19 espécies são reconhecidas (VEILLON, 1980). A maioria delas é nativa da Nova Caledônia (13 espécies), Ilhas Norfolk (uma espécie), Austrália e Nova Guiné (três espécies). As demais, *A. angustifolia* e *A. araucana*, são endêmicas a duas regiões da América do Sul (MATTOS, 1985; GROSFELD et al., 1999).

*A. angustifolia* (Bertol.) Kuntze é uma conífera pertencente a família Araucariaceae endêmica nas regiões sul e sudeste do Brasil (YAMAGUCHI; KATO, 2012), sendo juntamente às espécies do gênero *Podocarpus* as únicas gimnospermas arbóreas nativas no território brasileiro (ASTARITA et al., 2003). Estudos evolucionários indicam que o gênero *Araucaria* é o mais primitivo entre as coníferas, mostrando um padrão embriogenético que difere de outras coníferas tais como *Pinus*, *Taxus* e *Sequoia* (FRANCO et al, 2005). De acordo com Griffith (1952), neste gênero não há a produção de catáfilos, mas somente as folhas, nas laterais do meristema apical. Além disso, esse autor mostrou que não há um período de absoluta dormência da gema apical, fato comum nas coníferas norte-americanas, havendo somente uma redução quase absoluta da atividade mitótica e do alongamento nesta região.

É popularmente conhecida como “araucária”, “pinheiro”, “pinheiro do Paraná” ou “pinheiro brasileiro” sendo a principal componente da Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como “Floresta com Araucária”, unidade pertencente ao Bioma Mata Atlântica (IBGE, 2009).

Em geral, apresenta de 10 a 35 m de altura e 50 a 120 cm de DAP, atingindo excepcionalmente, 50 m de altura e 250 cm ou mais de diâmetro (CARVALHO, 1994).

Em condições normais, apresenta tronco reto, quase cilíndrico. A copa é caliciforme ou umbeliforme em árvores adultas e cônica nas jovens. As folhas são simples, alternas, espiraladas, lineares a lanceoladas, coriáceas com até 6 cm de comprimento por 10 mm de largura. As flores masculinas reúnem-se em

um amento cilíndrico alongado de 10 a 22 cm de comprimento por 2 a 5 cm de diâmetro, com escamas coriáceas e as flores femininas em estróbilos (pinhas). Os frutos (pseudofrutos) são reunidos no estróbilo feminino, com número variável de escamas (700 - 1200) e número variável de sementes (até 150); essas por sua vez, possuem tegumento duro e endosperma abundante, carnosas, com 3 a 8 cm de comprimento, por 1 a 2 cm de largura. A amêndoa é constituída por amido e no centro encontra-se o embrião com os cotilédones. Os pinhões amadurecem durante os meses frios do ano, perdurando até agosto quando praticamente se encerra o período reprodutivo (REITZ; KLEIN, 1966; CARVALHO, 1994).

A araucária é uma planta dioica, que pode ser monoica em função de traumas e doenças (MURAKAMI, 2002). Em suas árvores femininas são produzidos os cones, pinhas ou megastróbilos, onde estão contidos os gametófitos femininos. Nas árvores masculinas as flores são chamadas de amentilhos ou microstróbilos e neles estão os grãos de pólen, que são os gametófitos masculinos (BANDEL; GURGEL, 1967).

Após a fecundação, o período para a formação do tubo polínico no megastróbilo pode levar até dois anos e oito meses (KOSCINSKI, 1934; SHYMOIA, 1962; BANDEL; GURGEL, 1967). Já, o tempo para que as árvores atinjam a maturidade sexual e comecem a produzir frutos é de 15 a 20 anos de idade, quando já atingem entre 10 e 15 metros de altura. Essas características reprodutivas revelam alguns dos motivos pelos quais o reflorestamento desta espécie é bastante difícil e porque houve uma diminuição tão significativa das populações naturais de *A. angustifolia* (CARVALHO, 2012).

De acordo com Carvalho (1994), a araucária apresenta regeneração natural fraca em ambientes pouco perturbados. Forma todo o estrato superior da floresta em associação principalmente com os gêneros *Ilex*, *Ocotea* e *Podocarpus*, sendo uma espécie característica da fisionomia da vegetação.

A Floresta Ombrófila Mista ocorre no Brasil meridional, na Província de Misiones (Argentina) e no departamento Alto Paraná (Paraguai). Ocupa os planaltos sulinos, principalmente nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sendo também observada como disjunções nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, nos pontos mais altos das Serras de Paranapiacaba, Paranapanema, Mantiqueira, dos Órgãos e do Caparaó, em

altitudes que variam desde 200 m no extremo sul do Brasil até superiores a 1.500 m na Serra da Mantiqueira (BACKES, 2009).

Enquanto no Rio Grande do Sul é comum sua ocorrência até 500 m (HUECK, 1953), no Paraná, o limite comumente estabelecido para a Floresta com Araucária é a cota de 650-700 m (RODERJAN et al., 2002) e, em São Paulo, acima dos 750-800 m. Nos estados ao Norte, a araucária ocorre nas chamadas “matas ralas” da Serra da Mantiqueira, regularmente em altitudes elevadas (acima de 1.400 m) (HUECK, 1953). De acordo com Maack (1968) o desenvolvimento da floresta com araucária está intimamente relacionado com a altitude.

No geral, a espécie ocorre nas regiões com os tipos climáticos Cfa, Cwb e, preferencialmente, no tipo Cfb (Köppen). De acordo com o patamar altitudinal de ocupação o pinheiro do Paraná suporta bem as geadas, ocorrendo entre as altitudes entre 500 e 1.500 m. Abaixo desse limite a espécie persiste somente em bolsões de ar frio e em capões relictos (CARVALHO, 1994).

A araucária foi, durante anos, extensivamente explorada, devido à boa qualidade de sua madeira para construções e do alto teor de celulose para fabricação de papel, de modo que, na década de 1980, suas reservas naturais já estavam reduzidas consideravelmente (SILVA et al., 2001). Atualmente está enquadrada na categoria “em perigo” na Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção, conforme Portaria MMA nº 443, de 17 de dezembro de 2014 (BRASIL, 2014), devido à intensa exploração de sua madeira, ao grande consumo de suas sementes e a ineficácia das leis que visam sua conservação.

Embora frequentemente tratada como pioneira (REITZ; KLEIN, 1966; ARAÚJO et al., 2010; KLAUBERG et al., 2010; RODE et al., 2010), a araucária apresenta características incompatíveis com esse grupo ecológico, como sementes grandes, amiláceas e recalcitrantes, sem dormência e com pequena longevidade, dispersas por animais de porte médio a grande, produzidas em pequenas quantidades e com germinação hipógea. Além disso, é uma espécie longaeva, suas folhas são grossas, crassas e formam banco de plântulas e não de sementes. Assim, ainda que tenha seu desenvolvimento facilitado em locais

ensolarados (DUARTE et al., 2009), a espécie enquadra-se melhor, embora não sem controvérsia, como climática (KERSTEN et al., 2015).

## 2.2 ECOSSISTEMAS FLORESTAIS E O ESTOQUE DE CARBONO

O efeito estufa natural ocorre devido às concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. A energia solar de comprimento de onda curto ultrapassa a atmosfera terrestre sem interação com os GEE presentes nessa camada. Ao atingir a superfície terrestre, a energia é refletida e volta para a atmosfera com um comprimento de onda mais longo (infravermelho), que interage parcialmente com os GEE. Parte dessa irradiação é absorvida na atmosfera, aumentando consequentemente a temperatura média do ar. Essa interação permite que a temperatura média da atmosfera terrestre seja de 15 °C, promovendo o chamado “efeito estufa natural”, essencial para a existência da vida no planeta. Caso não houvesse esses gases na atmosfera, a temperatura média da Terra seria 33 °C menor, ou seja, -18 °C, o que inviabilizaria a vida atualmente existente (CARVALHO et al., 2010).

A principal causa do efeito estufa é a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e clorofluorcarbono (CFC). Entre eles, o CO<sub>2</sub> é o gás que mais contribui para o aquecimento global, devido à grande quantidade que é emitida, cerca de 55% do total. Por sua vez, a quantidade de CH<sub>4</sub> emitida para atmosfera é bem menor, mas seu potencial de aquecimento é 23 vezes maior que o de CO<sub>2</sub> (CERRI et al., 2007).

A concentração de CO<sub>2</sub> e de outros gases de efeito estufa tem aumentado drasticamente desde a revolução industrial. Desde 1750, aproximadamente 35% das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> estão diretamente relacionadas às mudanças do uso da terra (FOLEY et al., 2005).

De acordo com Silveira et al. (2008), houve um aumento do número de estudos e análises referentes não somente à preservação da biodiversidade das áreas florestais no planeta, mas também relacionados ao clima. As conclusões mostraram que a concentração do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e a temperatura da atmosfera aumentaram conjuntamente nas últimas dezenas de milhares de anos provocando mudanças climáticas.

O aumento da emissão de GEE e o consequente aquecimento global do planeta vêm acarretando a busca por estratégias que visem à redução das fontes desses gases. Nesse sentido, buscaram-se cada vez mais estratégias para redução da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, dentre elas pode-se citar a redução das emissões por queima de combustíveis fósseis, a redução da queima de material vegetal e o sequestro de carbono pelo plantio de florestas (CARVALHO et al., 2010).

As florestas promovem inúmeros benefícios diretos e indiretos ao ser humano e também contribuem, decisivamente, reduzindo os impactos ambientais provenientes do efeito estufa, através da absorção e fixação de carbono em sua biomassa (WEBER et al., 2003).

De acordo com Sanquetta e Balbinot (2004) o cultivo florestal desempenha um importante papel na absorção dos gases de efeito estufa, devido à sua capacidade de fixar quantidades de carbono na vegetação em longo prazo, amenizando assim, os problemas de mudanças climáticas. Os mesmos autores mencionaram que as florestas funcionam como sumidouros de carbono.

O sequestro de carbono refere-se à forma natural dos organismos vegetais de fixar o CO<sub>2</sub> em forma de matéria lenhosa. As folhas constituem-se na via principal de entrada de carbono para o ecossistema (ADUAN et al., 2003). É por meio do processo da fotossíntese que o carbono passa a fazer parte da biomassa. Na presença da luz, as plantas retiram o dióxido de carbono, usam o carbono para crescer e retornam o oxigênio para a atmosfera. Em suma, a fotossíntese é caracterizada pelo processo em que as plantas, com a ação da luz solar, transformam energia luminosa em tecido vivo. Esse tecido é denominado biomassa ou matéria orgânica (FARIA, 2012).

O carbono torna-se disponível para os seres vivos pelo processo de fotossíntese, e pelo fato do carbono ficar armazenado, costuma-se chamar carbono fixado. A decomposição biológica é um dos modos de reversão desse processo, liberando CO<sub>2</sub> para a atmosfera (BARRETO et al., 2009).

A determinação da quantidade de carbono estocado em indivíduos arbóreos e, conseqüentemente, em florestas ou povoamentos florestais pode ser realizada pela quantificação da biomassa e posterior determinação da concentração de carbono (CALDEIRA et al., 2015). Salomão et al. (1996)



destacaram que para avaliar os teores de carbono dos componentes da vegetação (parte aérea, raízes, camadas decompostas sobre o solo, entre outros) e contribuir para estudos de balanço energético e do ciclo de carbono, é preciso antes quantificar a biomassa vegetal de cada componente da vegetação.

## 2.3 BIOMASSA

Biomassa pode ser definida como a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta (também denominada necromassa), animal ou vegetal. Na área florestal pode significar toda massa existente na floresta ou em algum compartimento que a compõe, sendo também utilizado o termo fitomassa para referir-se a biomassa de origem vegetal (BROWN, 1997; SANQUETTA, 2002). Por ser o mais empregado nas discussões a respeito deste tema, será utilizado nesta pesquisa o termo biomassa.

Para Martinelli et al. (1994), biomassa é a quantidade expressa em massa do material vegetal disponível em uma floresta, sendo que os componentes de biomassa geralmente estimados são a biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, composta pela serapilheira e troncos caídos, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes. A biomassa total é dada pela soma de todos esses componentes.

O acúmulo de biomassa é afetado por fatores edafoclimáticos e por fatores inerentes à própria planta, ou seja, todos aqueles que afetam a fotossíntese e a respiração (KOZLOWSKI; PALLARDY, 1996), sendo os principais: luz, temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> do ar, umidade e fertilidade do solo, fungicidas, inseticidas e doenças. Além de fatores internos que incluem a idade das folhas, sua estrutura e disposição, distribuição e comportamento dos estômatos, teor de clorofila e acumulação de hidratos de carbono (CALDEIRA et al., 2001). Este acúmulo de biomassa e o crescimento das árvores dependem, entre outros fatores, da qualidade do sítio, disponibilidade de nutrientes no solo, das características climáticas e da altitude em que está localizada (KADEBA, 1994).

O reflexo das variações dos fatores ambientais e da própria planta se configura em uma relação entre biomassa e produtividade primária, conhecida como acúmulo de biomassa, a qual normalmente é baixa em florestas jovens de rápido crescimento e superior onde requer mais energia para manter o alto estoque de biomassa existente (SPURR; BARNES, 1986), indicando que o estoque de biomassa e de carbono varia conforme o estágio de desenvolvimento da formação florestal (LUGO et al., 1988; WATZLAWICK et al., 2002; CALDEIRA et al., 2011).

Durante o crescimento da árvore o incremento da biomassa do fuste é maior em relação aos demais componentes (GONÇALVES et al., 2004; MARTIN; JOKELA, 2004.). Segundo Otto (1994), durante a fase inicial do desenvolvimento de uma floresta, uma grande parte de carboidratos é canalizada para a produção de biomassa da copa. Posteriormente, quando as copas começam a competir entre si, a produção relativa de tronco aumenta e a de folhas e ramos diminui gradativamente.

Segundo Cromer et al. (1975) e Schumacher e Caldeira (2001), a produção de biomassa tende a aumentar com a idade e, de modo geral, a idade (GONÇALVES et al., 2004) e a densidade (LADEIRA et al., 2001) são os fatores que mais interferem na distribuição da biomassa entre os diferentes componentes das árvores.

Tipos diferentes de florestas armazenam diferentes quantidades de carbono em sua biomassa, e locais diferentes dentro de um mesmo tipo de floresta também variam muito com relação à quantidade de biomassa (HOUGHTON, 1994).

Alguns trabalhos de quantificação de biomassa vêm sendo realizados nas últimas décadas, porém, grande parte destes em florestas tropicais (BROWN et al., 1989; FEARNside, 1991; HIGUCHI et al., 1998; KETTERINGS et al., 2001; HIGUCHI et al., 2004; SEGURA; KANNINEN, 2005; NOGUEIRA et al., 2008; HENRY et al., 2010; LIMA et al., 2012) e, mais recente, em florestas subtropicais (CALDEIRA et al., 2004; SOCHER et al., 2008; WATZLAWICK et al., 2012; IMAÑA-ENCINAS et al., 2012; VOGEL et al., 2013).

## 2.4 DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DE BIOMASSA

A avaliação da biomassa pode ser feita pelo método direto (ou determinações), no qual as árvores são cortadas e seus componentes separados e pesados (SANQUETTA; BALBINOT, 2004), ou pelo método indireto (ou estimativas), no qual a estimativa de biomassa aérea consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal (HIGUCHI; CARVALHO JÚNIOR, 1994). De acordo com os mesmos autores, as estimativas podem ser feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados provenientes de inventários florestais (DAP, altura e volume), por dados de sensoriamento remoto (imagens de satélite) e utilizando-se uma base de dados em um sistema de informação geográfica (SIG).

As metodologias usadas para estimar a biomassa em áreas florestais são baseadas, principalmente, em dados de inventário florestal, empregando-se equações alométricas ou fatores de biomassa (SEGURA; KANNINEN, 2005; SOMOGYI et al., 2006; BREUGEL et al., 2011), que transformam dados de diâmetro, altura ou volume em tais estimativas. Segundo Sanquetta (2002) quando utilizado o método indireto, deve-se atentar para o ajuste e calibração prévia das equações, devendo ser empregado em conjunto com o método direto.

### 2.4.1 Métodos diretos

Os métodos diretos de amostragem de biomassa podem ser divididos em duas grandes categorias, o método da árvore individual e o método da parcela (SANQUETTA, 2002). O método da árvore individual é feito mediante a seleção de uma árvore média (*mean tree method*), sendo que, para se conhecer essa árvore, é preciso realizar um inventário florestal piloto e calcular o diâmetro ou a área seccional ou transversal da mesma. Esse autor afirmou que é comum o emprego da árvore de área seccional média ou “dg”. Após a definição dessa árvore, procede-se a derrubada e a determinação da biomassa de um número de indivíduos, que se constituem na amostra. Em florestas com estrutura mais complexa, geralmente é empregada uma variação desse

método. Nesse caso, será derrubado um determinado número de árvores para cada amplitude diamétrica, abrangendo todas as classes existentes na floresta.

O método da parcela é feito cortando-se e pesando-se toda a biomassa de uma área pré-definida. Nesse caso, determina-se toda a biomassa da floresta pelo corte e pesagem de todas as frações, incluindo as raízes, ou por amostragem em múltiplos estágios (*multi-stage sampling*), no qual cortam-se todos os indivíduos contidos na parcela, pesando-se todos os caules. Para as demais porções, são feitas determinações apenas para alguns indivíduos, estabelecendo-se uma relação de quantidades entre os dois grupos (PARDÉ, 1980). Para Brown et al. (1989), as estimativas geradas com base nessas parcelas não são confiáveis, porque baseiam-se em poucas parcelas, pequenas e tendenciosamente escolhidas. Por outro lado, Salati (1994) afirma que são utilizadas pequenas áreas (entre 0,2 a 1,0 ha), que servem para a calibragem das equações utilizadas nas estimativas indiretas, além de permitir o conhecimento detalhado da biomassa nos diferentes compartimentos da floresta.

O método direto de amostragem foi utilizado por Higuchi et al. (1998), Watzlawick et al. (2003); Caldeira et al. (2004); Vogel et al. (2006); Nogueira et al. (2008); Balbinot et al. (2009); Socher et al. (2008); Schumacher et al. (2011); Watzlawick et al. (2012) e Caldeira et al. (2015).

#### 2.4.2 Métodos indiretos

A avaliação da biomassa de forma indireta pode ser feita pela multiplicação de dados de volume de árvores ou talhões por fatores apropriados, denominados fatores de biomassa (BF), que convertem (expandem ou reduzem) as estimativas de volume para estimativas de biomassa (SOMOGYI et al., 2006).

Brown et al. (1989) citaram que, para converter dados de volume em biomassa, é necessário o desenvolvimento de fatores de expansão de biomassa (FEB), sendo estes a razão entre o peso seco total do indivíduo pelo seu volume comercial inventariado.

Fearnside (1997) afirmou que, em estimativas de biomassa a partir de volume, pode ser incluída a variável densidade, chamada de “densidade

básica”, calculada dividindo-se a massa seca pelo volume úmido. A condição de umidade usualmente se refere à amostra de madeira imersa na água em laboratório até a saturação. Essa condição é uma aproximação das condições que a madeira apresenta quando se encontra no seu estado natural em uma floresta.

Outra forma de se estimar biomassa de forma indireta é realizando o ajuste de equações pelo uso de técnicas de regressão. Segundo Koehler et al. (2002) é o procedimento mais comum, no qual algumas árvores são amostradas, o peso de cada componente é determinado e relacionado por meio de regressão com variáveis dendrométricas.

Brown (1997) afirmou que o uso de equações de regressão é mais vantajoso, pois são obtidas estimativas de biomassa sem a necessidade de se calcular a variável volume, mas tendo como desvantagem o fato de que geralmente não se tem dados de todas as classes de diâmetro, uma vez que grande parte dos inventários florestais visam somente a parte comercial de uma floresta, sendo geralmente medidos os diâmetros iguais ou superiores a 10 cm, desprezando-se árvores menores, que podem representar até 30% da biomassa de uma floresta. Como a maioria dos fenômenos naturais é tipicamente não linear, a utilização de modelos não lineares produz estimativas mais precisas do que os lineares (SANTOS, 1996).

Segundo Silveira et al. (2008), as técnicas de sensoriamento remoto também permitem estimar parâmetros biofísicos, como biomassa, carbono e volume de madeira, pelas propriedades espectrais dos componentes da vegetação (troncos, galhos, folhas, etc.). A utilização dessa técnica em florestas heterogêneas se torna mais complexa devido à grande diversidade florística, fisionômica e fenológica que esse tipo florestal apresenta. Para plantios florestais, por possuírem geralmente apenas um gênero e serem inventariadas periodicamente, esse trabalho se torna mais fácil e confiável (SOUZA; PONZONI, 1998).

Alguns trabalhos envolvendo os métodos indiretos de estimativa de biomassa e carbono foram publicados por Soares e Oliveira (2002); Sanquetta et al. (2003), Soares et al. (2005); Matos e Kirchner (2008); Mello e Gonçalves (2008), Nogueira et al. (2008); Silva et al. (2008); Balbinot et al. (2009); Watzlawick et al. (2009); Lima et al., (2012) e Silva et al., (2015).

## REFERÊNCIAS

- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2003. 30p.
- ARAÚJO, M. M.; CHAMI, L.; LONGHI, S. J.; AVILA, A. L.; BRENA, D. A. Análise de agrupamento em remanescente de Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 1-18, 2010.
- ASTARITA, L. V.; FLOH, E. I. S.; HANDRO, W. Free amino acid, protein and water content changes associated with seed development in *Araucaria angustifolia*. **Biologia Plantarum**, v. 47, n. 1, p. 53-59, 2003.
- BACKES, A. Distribuição geográfica atual da Floresta com Araucária: condicionamento climático. In: FONSECA, C. R.; SOUZA, A. F.; LEAL-ZANCHET, A. M.; DUTRA, T. L.; BACKES, A.; GANADE, G. (Eds.). **Floresta com Araucária. Ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável**. Ribeirão Preto: Editora Holos, 2009. p. 39-44.
- BALBINOT, R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; MARCENE, E. A. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 232-237, 2009.
- BANDEL, G.; GURGEL, J. T. A. Proporção do sexo em pinheiro brasileiro *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 6, p. 209-220, 1967.
- BARRETO, L. V.; FREITAS, A. C. S.; PAIVA, L. C. Sequestro de carbono. Centro Científico Conhecer. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, n. 7, p. 1-10. 2009.
- BRASIL. Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014. Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria\\_mma\\_443\\_2014.pdf](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria_mma_443_2014.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2017.
- BREUGEL, M. V.; RANSIJN, J.; CRAVEN, D.; BONGERS, F.; HALL, J. S. Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 8, p. 1648-1657, 2011.
- BROWN, S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. **FAO Forestry Paper** 134, FAO, United Nations, Rome. 1997. 58p.
- BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science**, Lawrence, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989.

CALDEIRA, M. V. W.; SAIDELLES, F. L. F.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. O. Biomassa de plantio de *Acacia mearnsii* De Wild., Rio Grande do Sul, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 133- 141, 2011.

CALDEIRA, M. V. W.; SOARES, R. V.; WATZLAWICK, L. F. Estimativa de biomassa em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista Montana – General Carneiro – PR. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 1, n. 3, p. 291-310, 2004.

CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F.; VIERA, M.; BALBINOT, R.; CASTRO, K. C. Biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 1027-1034, 2015.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; NETO, R. M. R; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, E. M. Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* De Wild., Procedência Batemans Bay – Austrália. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 79-91, 2001.

CARVALHO, B. G. **Diferenciação sexual de *Araucaria angustifolia* por RMN HR-MAS e análise multivariada**. 59 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Goiás – UFGO, Goiânia, 2012.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-289. 2010.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ/Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 640p.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CROMER, R. N.; RAUPACH, M.; CLARKE, A. R. P.; CAMERON, J. N. Eucalyptus plantations in Australia. The potential for intensive production. **Appita**, v. 29, p. 165-173, 1975.

DUARTE, L. S.; HARTZ, S. M.; PILLAR, V. de P. A dinâmica de nucleação dos pinhais sobre os campos no planalto sul-riograndense. In: FONSECA, C. R.; SOUZA, A. F.; LEAL-ZANCHET, A. M.; DUTRA, T.; BACKES, A.; GANADO, G. (Eds.). **Floresta com Araucária. Ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável**. Ribeirão Preto: Editora Holos, 2009. p. 75-84.

FARIA, R. A. V. B. **Estoque de carbono e atributos florísticos e edáficos de ecossistemas florestais em processo de restauração**. 167 f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras. 2012.



FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gas contributions from deforestation in Brazilian Amazonia. In: LEVINE, J. S. (Ed.). **Global Biomass Burning: Atmospheric Climatic and Biospheric Implications**. Boston: MIT, p. 92-105, 1991.

FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 59-87, 1997.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, Washington, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FRANCO, A. C.; DUARTE, H. M.; GEBLER, A.; MATTOS, E. A.; NAHM, M.; RENNENBERG, H.; RIBEIRO, K. T.; SCARANO, F. R.; LÜTTGE, U. In situ measurements of carbon and nitrogen distribution and composition, photochemical efficiency and stable isotope ratios in *Araucaria angustifolia*. **Trees**, v. 19, n. 4, p.422-430, 2005.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 13-64.

GRIFFITH, M. M. The structure and growth of the shoot apex in *Araucaria*. **American Journal of Botany**, v. 39, n. 4, p. 253-263, 1952.

GROSFELD, J.; BARTHÉLÉMY, D.; BRION, C. Architectural variations of *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch (Araucariaceae) in its natural habitat. In: KURMANN, M. H.; HEMSLEY A. R. (Eds.). **The Evolution of Plant Architecture**. Londres: Royal Botanic Gardens, Kew, 1999. p. 109-122.

HENRY, M.; BESNARD, A.; ASANTE, W. A.; ESHUN, J.; ADU-BREDU, S.; VALENTINI, R.; BERNOUX, M.; SAINT-ANDRÉ, L. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 8, p. 1375-1388, 2010.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD/FBDS, 1994. p.125-145.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. P.; ROCHA, R. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.



HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 153-165, 1998.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO<sub>2</sub> – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro, 1994. p. 38–76.

HUECK, K. Distribuição e habitat natural do Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*). **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo**, v. 10, p. 1-24, 1953.

IBGE. **Mapa de aplicação da Lei nº 11.428 de 2006 que dispõem sobre a utilização e proteção do Bioma Mata Atlântica e de outras providências**. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009.

IMANÃ-ENCINAS, J.; PAULA, J. E.; CONCEIÇÃO, C. A. Florística, volume e biomassa lenhosa de um fragmento de Mata Atlântica no município de Santa Maria de Jetibá, Espírito Santo. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 565-576, 2012.

KADEBA, O. Growth and nutrient accumulation by *Pinus caribaea* on three savanna sites in northern Nigeria. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 49, p. 139-147, 1994.

KERSTEN, R. A.; BORGIO, M.; GALVÃO, F. Floresta Ombrófila Mista: aspectos fitogeográficos, ecológicos e métodos de estudo. In: EISENLOHR, P. V.; MELO, M. M. R. F.; ANDRADE, L. A.; MEIRA NETO, A. A. (Eds.). **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de caso**. Viçosa: UFV, 2015. p. 156-182.

KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. V.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, n. 1-3, p. 199-209, 2001.

KLAUBERG, C.; PALUDO, G. F.; BORTOLUZZI, R. L. C.; MANTOVANI, A. Florística e estrutura de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Planalto Catarinense. **Biotemas**, v. 23, n. 1, p. 35-47, 2010.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 251-264.

KOSCINSKI, M. **O pinheiro brasileiro na Silvicultura Paulista**. Secretaria da Agricultura: Diretoria de Publicidade Agrícola, São Paulo. 1934. 56p.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiological of woody**. 2 ed. San Diego: Academic, 1996. 432p.

LADEIRA, B. C.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos em uma sequencia de idade. **Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 69-78, 2001.

LIMA, A. J. N.; SUWA, R.; RIBEIRO, G. H. P. M.; KAJIMOTO, T.; SANTOS, J.; SILVA, R. P.; SOUZA, C. A. S.; BARROS, P. C.; NOGUCHI, H.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 277, p. 163-172, 2012.

LUGO, A. E.; BROWN, S.; CHAPMAN, J. An analytical review of production rates and stem wood biomass of tropical forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 23, n. 2-3, p. 179-200, 1988.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Livraria José Olympio. Curitiba. 1968. 442p.

MARTIN, T. A.; JOKELA, E. J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 39-58, 2004.

MATOS, F. D. A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa da Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme na Amazônia Central com o Satélite Ikonos II. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 157-171, 2008.

MATTOS, J. R. Araucariaceae do Rio Grande do Sul. **Roessléria**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 17-37, 1985.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Árvore**, v.32, n.1, p.101-111, 2008.

MURAKAMI, M. H. **Identificação de marcador molecular ligado à expressão sexual em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 63 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba. 2002.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNside, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 11, p. 1853-1867, 2008.

OTTO, H. J. **Waldökologie**. Stuttgart, Ulmer, 1994. 391p.

PARDÉ, J. **Forest biomass**. In: Forestry Abstract Review Article. França: Station de Silviculture et de Production, Centre National de Recherches Forestieres, vol. 41. p. 349–352. 1980.

REITZ, R.; KLEIN, R. M. **Araucariáceas**. In: Flora Ilustrada Catarinense. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues. 1966. p. 1-62.

RODE, R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; GALVÃO, F.; MACHADO, S. A. Estrutura horizontal da comunidade arbórea sob um povoamento com *Araucaria angustifolia* e uma Floresta Ombrófila Mista. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 347-361, 2010.

RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y. S.; HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná. **Ciência e Ambiente**, v. 24, n. 1, p. 75-92, 2002.

SALATI, E. Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, p. 15-37, 1994.

SALOMÃO, R. P.; NEPSTAD, D. C.; VIEIRA, I. C. G. Como a biomassa de florestas tropicais influi no efeito estufa? **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 21, n. 123, p. 38-47, 1996.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 119-140.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. (Eds.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR/Ecoplan, 2004, p. 47-63.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 33-40. 2003.

SANTOS, J. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da Floresta Tropical Úmida de Terra-Firme da Amazônia brasileira**. 121 f. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 1996.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G.; VIERA, M. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 53-62, 2011.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2-8, 2005.

SHYMOIA, C. Contribuição ao estudo do ciclo biológico da *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Experientiae**, v. 2, n. 2, p. 519-540, 1962.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. P. C.; PICCOLO, M. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.

SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; BOGNOLA, I. A. Recomendação de solos para *Araucaria angustifolia* com base nas suas propriedades físicas e químicas. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 43, p. 61-74, 2001.

SILVA, R. F.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, L. M.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 979-992, 2008.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.1, p.185-206, 2008.

SOARES, C. P. B., LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711- 718, 2005.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

SOCHER, L. G.; RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F. Biomassa aérea de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial no município de Araucária (PR). **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 245-252, 2008.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, R.; MAKIPAA, R.; MUUKKONEN, P.; LEHTONEN, A.; WEISS, P. Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal Forest Research**, v. 126, n. 2, p 197–207, 2006.

SOUZA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/LANDSAT para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de

*Pinus* spp. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., Santos. **Anais...** Santos: INPE, 1998. 1 CD-ROM.

SPURR, S. H.; BARNES, B. V. **Ecologia Forestal**, México. 1986. 690p.

VEILLON, J.M. Architecture des espèces néo-calédoniennes du genre *Araucaria*. **Candollea**, n. 35, v. 2, p. 609-640, 1980.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Biomassa e macronutrientes de uma Floresta Estacional Decidual em Itaara-RS, Brasil. **Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 1, 99-105, 2013.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma Floresta Estacional Decidual em Itaara, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.4, p.419-425, 2006.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. O.; BALBINOT, R. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana, Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n.95, p. 353-362, 2012.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de Carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 153-190.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Kuntze no Sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p. 63-68, 2003.

WEBER, K. S.; SANQUETTA, C. R.; MELLO, A. A.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R. Variação nos teores de carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 22, n. 76, p. 23-28, 2003.

YAMAGUCHI, L. F.; KATO, M. J. Diurnal and seasonal changes in biflavonoids biosynthesis in *Araucaria angustifolia* needles. **Global Journal of Biochemistry**, n. 3, p. 1-7, 2012.

## CAPÍTULO 1

### QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA E DO CARBONO ORGÂNICO EM ÁRVORES NATIVAS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

#### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar o acúmulo de biomassa aérea e carbono orgânico em indivíduos nativos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, localizados em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana no município de Fernandes Pinheiro, Paraná. A determinação da biomassa aérea foi realizada de acordo com o método direto de quantificação, pela amostragem de 29 árvores com DAP  $\geq 40$  cm, distribuídas aleatoriamente no fragmento, visando cobrir a variabilidade diamétrica. Após a derrubada e cubagem das árvores, cada uma teve seus componentes (grimpas, galhos, lenho e casca do fuste) separados, pesados e amostrados para a determinação dos teores de umidade e carbono orgânico acumulado. A média da produção individual de biomassa aérea e carbono orgânico foi de 2126,5 kg.ind<sup>-1</sup> e 935,8 kg.ind<sup>-1</sup>, respectivamente. Os teores de carbono orgânico apresentaram pouca variação entre os diferentes componentes, resultando numa distribuição relativa do carbono orgânico próxima a da biomassa aérea, sendo: lenho do fuste (55,1%) > casca do fuste (19,7%) > galhos (19,1%) > grimpas (6,1%). Os teores médios de umidade para o fuste (lenho + casca), galhos e grimpas foram, respectivamente, 52,2%, 53,5% e 56,5%, indicando que as araucárias com DAP  $\geq 40$  cm acumulam em sua estrutura aérea, em média, 2.376,6 litros.ind<sup>-1</sup> de água. O fator idade não resultou, necessariamente, em uma maior produção em volume, todavia, acarretou em uma maior produção de biomassa do fuste em indivíduos com volumes semelhantes, devido à influência na densidade da madeira. A biomassa dos galhos e grimpas, mesmo indicando uma relação positiva com o volume apresentaram muitas oscilações. Nesse sentido, as condições que afetam o crescimento da copa apresentam maior influência na quantidade total de biomassa desses componentes em comparação à produção em volume. O acúmulo de carbono orgânico por indivíduos nativos de *A. angustifolia* deve subsidiar a obtenção de créditos de carbono como incentivo a conservação da araucária e dos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, dada à vulnerabilidade da espécie e de seu ambiente natural.

**Palavras-chave:** crédito de carbono; Floresta Ombrófila Mista; sequestro de carbono.



## CHAPTER 1

### QUANTIFICATION OF ABOVEGROUND BIOMASS AND ORGANIC CARBON OF *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze NATIVE TREES

#### ABSTRACT

The aim of this work was to determine the accumulation of aboveground biomass and organic carbon in native trees of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, located in a fragment of Mixed Ombrophilous Forest in Fernandes Pinheiro, Paraná. The aboveground biomass determination was carried out according to the direct quantification method, by sampling 29 trees with DBH  $\geq 40$  cm, randomly distributed in the fragment, aiming to cover the diametric variability. After the trees were felled and scaled each one had its components (leaves, branches, wood and bark of the stem) separated, weighed and sampled for the determination of the content of moisture and accumulated organic carbon. The average individual production of aboveground biomass and organic carbon was 2126.5 kg.ind<sup>-1</sup> and 935.8 kg.ind<sup>-1</sup>, respectively. The organic carbon contents presented low variation among the different components, resulting in a relative distribution of the organic carbon similar to the aboveground biomass, being: wood of the stem (55.1%) > bark of the stem (19.7%) > branches (19.1%) > leaves (6.1%). The average moisture contents for the stem (wood + bark), branches and leaves were, respectively, 52.2%, 53.5% and 56.5%, indicating that araucarias with DBH  $\geq 40$  cm accumulate in their aerial structure, on average, 4035.9 liters.ind<sup>-1</sup> of water. Age did not necessarily result in higher volume production; however, it resulted in a higher production of stem biomass in individuals with similar volumes, due to the influence of wood density. The biomass of the branches and leaves, even indicating a positive relation with the volume, presented many oscillations. In this sense, the conditions that affect the canopy growth have a greater influence on the total amount of biomass of these components in comparison to the production in volume. The accumulation of organic carbon by native trees of *A. angustifolia* should support carbon credits as an incentive for the conservation of araucaria and fragments of the Mixed Ombrophilous Forest due to the vulnerability of the species and its natural environment.

**Keywords:** carbon credit; carbon sequestration; Mixed Ombrophilous Forest.

## 1 INTRODUÇÃO

A relação entre a concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera e o aumento da temperatura média do planeta (DLUGOKENCKY; TANS, 2017) fundamenta as preocupações quanto aos impactos do aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) sobre o clima em escala mundial (IPCC, 2003) e mais recente e, especificamente no Brasil (PBMC, 2014a, b). Em paralelo, a cada dia cresce o interesse por estudos sobre a capacidade das florestas em remover o  $\text{CO}_2$  da atmosfera e armazenar o carbono em sua biomassa (CALDEIRA et al., 2015).

O volume de biomassa florestal é o fator controlador do estoque de carbono global e sua quantificação é necessária para entender a produtividade, alocações de nutrientes e ciclos de carbono nos indivíduos ou nos ecossistemas (HIGUCHI; CARVALHO JÚNIOR, 1994; VOGEL et al., 2006; SILVEIRA et al., 2008), como também serve de base para a predição futura das mudanças climáticas (SEDJO, 1992; DIXON et al., 1994). Watson (2009) corrobora dizendo que quantificar o carbono em ecossistemas florestais e suas mudanças decorrentes de atividades humanas é o primeiro passo para melhor representar as florestas na política climática, em escala regional, nacional e global.

Conforme Caldeira et al. (2004) a conservação das florestas naturais depende basicamente do conhecimento de suas dinâmicas. No entanto, raras são as informações referentes à capacidade produtiva das florestas naturais, especificamente da Floresta Ombrófila Mista, dificultando assim o monitoramento permanente da dinâmica de crescimento e regeneração destes ecossistemas. Os mesmos autores afirmaram ainda que estas informações são importantes para possibilitar a exploração de florestas naturais sob forma de manejo sustentado ou, ainda, para subsidiar ações para sua conservação.

A escassez de trabalhos sobre biomassa e carbono desenvolvidos em florestas naturais deve-se à dificuldade na coleta de dados, devido à complexidade ambiental destas formações, aos custos elevados para a realização dos estudos, ao grande número de pessoas necessárias ao desenvolvimento dos trabalhos e, principalmente, a dificuldade na obtenção de



licença ambiental para intervenção, como é o caso da Floresta Ombrófila Mista, mesmo que para o desenvolvimento de pesquisa científica.

Ainda assim, é necessário desenvolver estudos quanto a métodos de quantificação da biomassa e carbono, nos diversos componentes da planta, que possibilitem uma melhor compreensão do sequestro e armazenamento de carbono da atmosfera pelas florestas (WATZLAWICK et al., 2002).

Segundo Caldeira et al. (2015) a determinação da quantidade de carbono estocado em indivíduos arbóreos e, conseqüentemente, em florestas ou povoamentos florestais pode ser realizada pela quantificação da biomassa e posterior determinação da concentração de carbono. A biomassa pode ser quantificada pelo método direto ou estimada, pelo método indireto. Quantificação significa medida real executada diretamente a campo ou peso determinado a campo, como a pesagem de algum compartimento arbóreo com balança ou dinamômetro (HIGUCHI; CARVALHO JUNIOR, 1994). A estimativa de biomassa pelo método indireto consiste na utilização de variáveis de fácil obtenção, e desta forma, não necessitando a derrubada das árvores (SILVEIRA et al., 2008). Esses mesmos autores comentaram que estimativas podem ser feitas por meio de relações quantitativas e matemáticas, como fatores (expansão e redução) de biomassa, modelos alométricos que utilizam dados provenientes de inventários florestais (DAP, altura e volume), por dados de sensoriamento remoto (imagens de satélite) e utilizando-se uma base de dados em um sistema de informação geográfica (GIS). Pesquisas recentes tem avaliado o emprego de técnicas de Inteligência Artificial para a estimativa da biomassa e carbono (SCHOENINGER et al., 2008; SANQUETTA et al., 2013; SANQUETTA et al., 2015). Os métodos indiretos não devem ser utilizados sem o ajuste e a calibragem prévia das equações e, portanto, devem ser empregados em conjunto com os métodos diretos (SANQUETTA, 2002; BALBINOT et al., 2009).

Alguns estudos de biomassa e carbono foram desenvolvidos em Floresta Ombrófila Mista (CALDEIRA et al., 2004; SOCHER et al., 2008; BALBINOT et al., 2009; WATZLAWICK et al., 2009; WATZLAWICK et al., 2011; WATZLAWICK et al., 2012) e também em povoamentos florestais especificamente com a espécie *Araucaria angustifolia* (WATZLAWICK et al.,

2003; DALLAGNOL et al., 2011; SCHUMACHER et al., 2011; MOGNON et al., 2013; SANQUETTA et al., 2014; CALDEIRA et al., 2015).

Nos trabalhos realizados em Floresta Ombrófila Mista, a quantificação da biomassa é feita, na maioria dos casos, pelo método direto (método da parcela). Nesse caso, geralmente são avaliadas poucas parcelas e estas, por sua vez, apresentam tamanho limitado, devido às dificuldades inerentes à própria avaliação de biomassa associadas às características dimensionais da espécie *A. angustifolia*. Dessa forma o número de indivíduos nativos amostrados da espécie é reduzido. Soma-se a isso o fato das condições dos indivíduos estabelecidos em povoamentos florestais distinguirem daquelas correspondentes aos indivíduos estabelecidos em fragmentos nativos, o que prejudica a utilização de tais informações como base comparativa. Nesse sentido, torna-se necessário uma investigação mais profunda quanto aos valores de biomassa e carbono em indivíduos nativos de *A. angustifolia*.

Segundo Socher et al. (2008) para estudos confiáveis de biomassa é necessária, ao menos numa primeira abordagem, a execução de uma amostragem destrutiva, na qual são analisados os diversos componentes da árvore, sendo que a separação e a especificação desses componentes variam de acordo com o tipo de floresta e os objetivos a serem alcançados

Diante do exposto, o objetivo da presente pesquisa foi gerar informações sobre o acúmulo de biomassa vegetal aérea e carbono orgânico individuais em árvores nativas de *Araucaria angustifolia*, bem como avaliar a relação da biomassa aérea total e dos diferentes componentes com as variáveis volume e idade.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Gerar informações sobre o acúmulo de biomassa vegetal aérea e carbono orgânico individuais em árvores nativas de *Araucaria angustifolia*, bem como avaliar a relação da biomassa aérea total e dos diferentes componentes com as variáveis volume e idade.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Quantificar a biomassa aérea e o carbono orgânico totais e para os componentes: lenho do fuste, casca do fuste, galhos e grimpas;
- b) Calcular os teores de umidade e carbono orgânico para cada componente;
- c) Avaliar a distribuição do estoque de biomassa aérea e carbono orgânico nos diferentes componentes;
- d) Avaliar a relação entre os fatores idade e volume com a produção de biomassa aérea.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana (IBGE, 1992) localizado na sub-bacia do rio Imbituvão, comunidade do Assungui, município de Fernandes Pinheiro, estado do Paraná (FIGURA 1). Tal fragmento constitui uma área de atuação do projeto “Estratégias para o manejo florestal sustentável em pequenas propriedades rurais no Centro-Sul do Paraná, Brasil”.

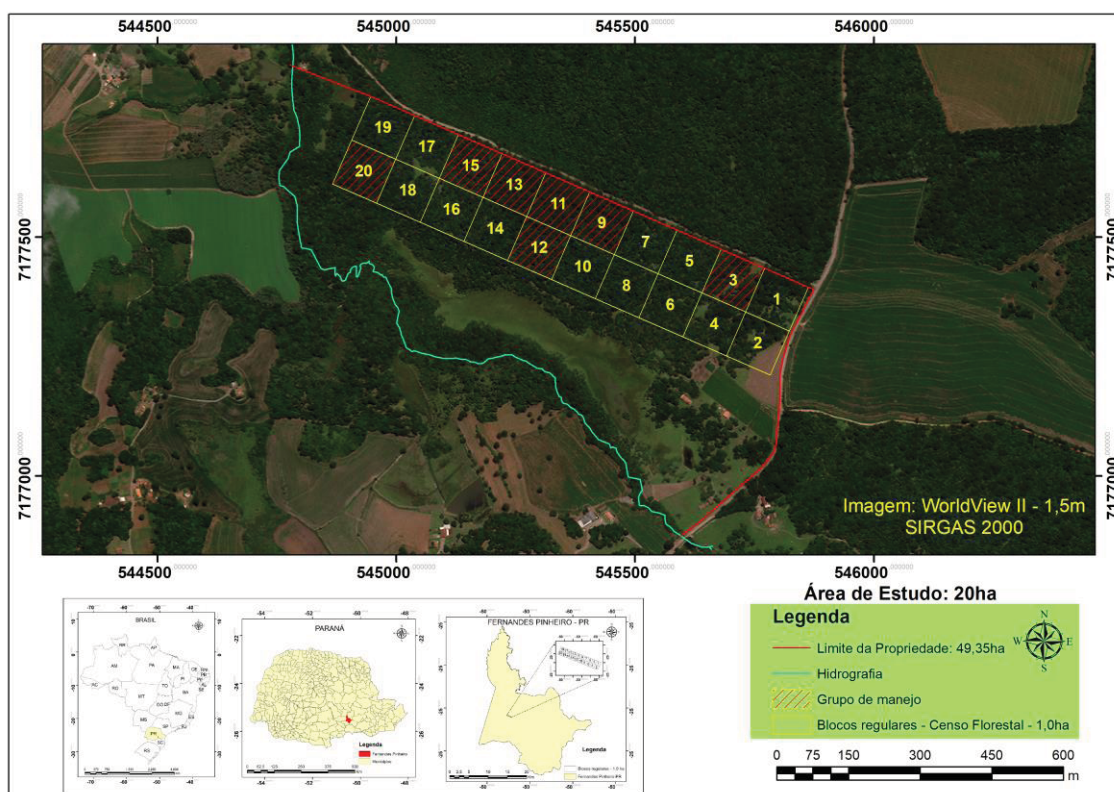


FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

O projeto “Imbituvão”, como é chamado, é desenvolvido pela Universidade Estadual do Centro-Oeste em cooperação com a Universidade de Ciências Florestais Aplicadas de Rottenburg, Alemanha, contando com recursos dos governos do Brasil e da Alemanha por meio das Secretarias do Estado da Ciência e Tecnologia e Ensino Superior (SETI) e do Ministério para Ciência, Pesquisa e Artes (Baden-Württemberg), além do CNPq. O projeto tem como objetivo geral atuar diretamente na questão da produção, qualidade de vida, geração de renda e conservação ambiental, buscando a valorização da

floresta nativa e a sustentabilidade da pequena propriedade rural inserida em um contexto associativista, promovendo assim o desenvolvimento rural da região Centro-Sul do Paraná. Além disso, tem como meta em médio e longo prazo, gerar um modelo de manejo florestal sustentável para remanescentes da Floresta com Araucária.

O município de Fernandes Pinheiro localiza-se na região Centro-Sul do Paraná (25° 27' S e 50° 35' W), a uma altitude de 893 metros (WREGE et al., 2012). Faz limite com os municípios de Imbituva, Teixeira Soares, São João do Triunfo, Rebouças, e Irati (IBGE, 2017).

O clima da região é classificado como Cfb (Köppen), Subtropical Úmido Mesotérmico, ou seja, temperado com verões frescos e invernos com ocorrência de geadas severas e sem estação seca. A temperatura média anual é de 19 °C, a média das temperaturas mínimas mensais é de 13,9 °C e a média das temperaturas máximas mensais é de 26,1 °C. A precipitação anual varia entre 1400 e 1600 mm e a umidade relativa do ar média é de 74% (WREGE et al., 2012).

Foi realizado censo florestal em 20,0 dos 24,5 ha de área total do remanescente de Floresta Ombrófila. Foram instaladas 20 parcelas de 1 ha cada (100 m x 100 m). Os diâmetros de todos os indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) igual ou superior a 30 cm foram mensurados, além das alturas total e comercial. Adicionalmente foram instaladas parcelas de 3.600 m<sup>2</sup> (60 m x 60 m) no centro de cada parcela de 1 ha para avaliação dos indivíduos com 10 cm ≤ DAP < 30 cm. Foram avaliadas ainda, as condições de retidão do fuste, iluminação e forma da copa, fitossanidade e posição em relação ao estrato de ocupação. Realizou-se também a diferenciação entre indivíduos machos e fêmeas pela identificação de suas estruturas reprodutivas.

De modo a reduzir a variabilidade estrutural do fragmento foi realizada uma estratificação da área através das análises de agrupamento e discriminante. Para isso, foram consideradas as variáveis número de árvores e área basal referentes às araucárias, às folhosas e ao total. Dessa forma o fragmento foi subdividido em três estratos, sendo: (i) um estrato caracterizado pela dominância de araucárias, (ii) um estrato caracterizado pela dominância de folhosas e, (iii) um estrato caracterizado pelo equilíbrio entre araucárias e folhosas.

A determinação da biomassa no campo foi realizada de acordo com o método direto de quantificação, pela amostragem de 29 árvores com DAP  $\geq 40$  cm, distribuídas aleatoriamente no fragmento, visando cobrir a variabilidade diamétrica. A amostragem de indivíduos (TABELA 1) somente nas classes de diâmetro iguais ou superiores a 40 cm está relacionada à metodologia do experimento de manejo florestal sustentável, desenvolvido pelo projeto Imbituvão, que prevê a aplicação de diferentes intensidades de corte exclusivamente nas maiores classes de diâmetro, reduzindo a competição entre os indivíduos, favorecendo assim, o desenvolvimento das árvores remanescentes. Também em função da metodologia adotada pelo projeto, todas as árvores que compõem o banco de dados usados nesta pesquisa faziam parte do estrato caracterizado pela dominância de araucárias.

TABELA 1 – VOLUME, IDADE E NÚMERO DE INDIVÍDUOS AMOSTRADOS DA ESPÉCIE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze.

Classe de DAP (cm)		40-50	50-60	60-70	Total
Indivíduos amostrados	Machos	3	7	3	13
	Fêmeas	9	6	1	16
	Total	12	13	4	29
Volume (m <sup>3</sup> .indivíduo <sup>-1</sup> )	mínimo	1,37	2,34	3,89	1,37
	média	1,99	3,31	4,64	2,94
	máximo	2,74	4,32	5,30	5,30
Idade (anos)	mínimo	80	87	99	80
	média	99	101	126	104
	máximo	111	119	188	188

Os indivíduos foram derrubados, obtendo-se inicialmente as variáveis dendrométricas: DAP (antes da derrubada), altura total e altura comercial (altura correspondente ao primeiro verticilo). Procedeu-se a cubagem relativa do fuste com casca, tomando-se medidas de diâmetro com casca a 0,1; 0,7 e 1,3 m e, a partir daí, a 15, 25,... até 95% da altura total.

O volume sem casca foi obtido com base na medição dos diâmetros sem casca nas seções seccionadas do fuste comercial (toras comercializáveis, cujos sortimentos variaram entre 3, 4 e 5 m de comprimento) e do fuste não comercial (pontos de coleta de amostras). Para o cálculo do volume, foi utilizada a fórmula de Smalian, sendo a última seção considerada como um cone.



Após a cubagem do fuste com casca, cada árvore teve seus componentes (grimpas, galhos, fuste comercial com casca e fuste não comercial com casca) separados, pesados e amostrados. Nesta pesquisa, adotou-se o termo “grimpas” para referir-se às folhas da araucária, devido o mesmo ser amplamente reconhecido e utilizado. As estruturas reprodutivas masculinas foram pesadas juntamente com as grimpas. As estruturas reprodutivas femininas foram desconsideradas da análise, visto que no momento da coleta dos dados, poucas foram encontradas.

Cada componente foi pesado separadamente, obtendo-se a biomassa verde, utilizando-se, para tal, um dinamômetro com capacidade para 3.000 kg. O fuste com casca foi seccionado com base no sortimento otimizado das toras. A quantificação do peso total da casca foi feita com base no percentual de casca do fuste, obtido pela cubagem das toras e do fuste não comercial.

Para amostragem do fuste, o mesmo foi dividido em fuste comercial (seção correspondente desde a base até o primeiro verticilo) e fuste não comercial (seção compreendida entre o primeiro verticilo e a altura total). Para a amostragem do lenho com casca do fuste comercial, foram retirados três discos de aproximadamente 5 cm de espessura referentes a base, meio e extremidade da seção. Para o fuste não comercial, retirou-se uma amostra a 50% do comprimento da copa de tal forma que contemplasse um verticilo e um espaço entre verticilos. Pela contagem dos anéis de crescimento do disco da base, determinou-se a idade de cada indivíduo.

A amostragem das grimpas foi realizada no terço inferior, médio e superior da copa. Para o componente “galhos” adotou-se o mesmo procedimento, retirando-se amostras com casca na extremidade, meio e base dos galhos.

As amostras foram levadas para laboratório e secas em estufa de renovação e circulação de ar a uma temperatura constante de 65 °C até atingir peso constante, para posterior determinação do teor de umidade e preparação para análise química do teor de carbono orgânico. Para o cálculo do teor de umidade da amostra, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$TU = \frac{(Bv - Bs)}{Bv} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que: TU = teor de umidade (%); Bv = biomassa verde da amostra (gramas); Bs = biomassa seca da amostra (gramas).

Com base nos valores de biomassa verde e teores de umidade de cada componente das árvores amostradas, realizaram-se os cálculos da biomassa seca, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$Bs = Bv(1 - TU) \quad (2)$$

Em que: Bs = biomassa seca (kg); Bv = biomassa verde (kg); TU = teor de umidade (%).

Para os cálculos de biomassa seca do fuste comercial, utilizou-se o teor de umidade médio ponderado pela massa dos discos (amostras), inferior e superior, relativos àquela seção.

Para a determinação do teor de carbono as amostras foram primeiramente fragmentadas com auxílio de uma serra plaina e trituradas em moinho de facas tipo Willey e Croton com peneira de mesh 20 e efetuada a análise pelo método de combustão direta, empregando-se o analisador elementar da marca LECO modelo C-144.

Nesse método, a amostra é colocada em um ambiente de oxigênio puro com temperatura regulada tipicamente em 1.350 °C, sendo submetida à combustão completa, liberando o carbono como dióxido de carbono, sendo a medição realizada por sensores de infravermelho. O aparelho converte o resultado em porcentagem, usando uma equação predefinida no software que leva em conta o peso da amostra, a calibração e o valor de umidade conhecida (LECO, 2008).

A casca foi separada da madeira, para a determinação do teor de carbono individual para cada fração. Para a determinação do teor de carbono do fuste comercial, as amostras foram agrupadas em uma amostra composta.



Após a determinação do teor de carbono orgânico em cada fração amostrada, realizaram-se os cálculos relativos à quantificação do carbono em cada componente, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$CO = Bs.TCO \quad (3)$$

Em que: CO = carbono orgânico (kg); Bs = biomassa seca (kg); TCO = teor de carbono orgânico ( $\text{g.kg}^{-1}$ ).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média da produção de biomassa aérea individual foi de 2126,5 kg.ind<sup>-1</sup>, sendo 1171,6 kg.ind<sup>-1</sup> referentes ao lenho do fuste; 418,7 kg.ind<sup>-1</sup> à casca do fuste, 406,1 kg.ind<sup>-1</sup> aos galhos e 130,1 kg.ind<sup>-1</sup> às grimpas. Os maiores valores relativos de biomassa seca do lenho e casca do fuste, foram observados na menor classe de diâmetro (centro de classe 45 cm) seguida pela classe intermediária (centro de classe 55 cm), ou seja, a relação entre o tamanho (representado pela classe de DAP) e o percentual de biomassa seca do lenho e casca do fuste ocorre de forma inversa. Resultado contrário foi observado para a biomassa seca dos galhos e grimpas, onde os maiores e menores valores relativos foram observados na maior e menor classe de diâmetro, respectivamente. Para a média de todas as árvores avaliadas, 55,1% da biomassa seca foi proveniente do lenho do fuste, 19,7% da casca do fuste, 19,1% dos galhos e 6,1% das grimpas (TABELA 2).

TABELA 2 – VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DE BIOMASSA SECA DE *Araucaria angustifolia* POR CLASSE DE DAP, PARA CADA COMPONENTE AVALIADO E PARA O TOTAL.

Classe de DAP (cm)		LENHO		CASCA		GALHOS		GRIMPAS		TOTAL
		(kg.ind <sup>-1</sup> )	(%)	(kg.ind <sup>-1</sup> )	(%)	(kg.ind <sup>-1</sup> )	(%)	(kg.ind <sup>-1</sup> )	(%)	(kg.ind <sup>-1</sup> )
40,0 – 49,9	Mínimo	557,4	53,7	251,6	17,5	89,0	7,6	30,6	1,8	960,3
	Médio	829,5	57,8	296,2	20,6	225,3	15,7	83,7	5,8	1434,7
	Máximo	1149,7	65,5	405,6	26,2	416,5	25,2	188,6	10,4	1865,9
50,0 – 59,9	Mínimo	895,5	47,2	323,5	14,5	67,1	4,9	59,2	4,3	1362,4
	Médio	1269,9	54,5	454,1	19,5	462,8	19,9	144,5	6,2	2331,3
	Máximo	1599,1	65,7	608,7	25,0	712,5	26,8	227,1	8,0	2882,8
60,0 – 69,9	Mínimo	1580,4	51,5	532,8	16,4	615,4	19,5	118,9	3,0	3037,8
	Médio	1878,3	53,1	671,6	19,0	764,3	21,6	222,4	6,3	3536,6
	Máximo	2158,0	54,3	803,8	20,2	895,6	24,3	259,8	8,6	3976,2
MÉDIA PONDERADA		1171,6	55,1	418,7	19,7	406,1	19,1	130,1	6,1	2126,5

Em relação ao carbono orgânico acumulado, foi encontrado em média 935,8 kg.ind<sup>-1</sup>, sendo 514,7 kg.ind<sup>-1</sup> correspondentes ao lenho do fuste; 185,4 kg.ind<sup>-1</sup> à casca do fuste, 178,6 kg.ind<sup>-1</sup> aos galhos e 57,1 kg.ind<sup>-1</sup> às grimpas, conforme pode ser observado na TABELA 3.

TABELA 3 – VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DE CARBONO ORGÂNICO DE *Araucaria angustifolia* POR CLASSE DE DAP, PARA CADA COMPONENTE AVALIADO E PARA O TOTAL.

Classe de DAP (cm)		LENHO (kg.ind <sup>-1</sup> )   %		CASCA (kg.ind <sup>-1</sup> )   %		GALHOS (kg.ind <sup>-1</sup> )   %		GRIMPAS (kg.ind <sup>-1</sup> )   %		TOTAL (kg.ind <sup>-1</sup> )
40,0 – 49,9	Mínimo	246,8	53,7	111,4	17,5	39,1	7,6	13,4	1,8	425,3
	Médio	366,0	57,8	131,1	20,7	99,3	15,7	36,9	5,8	633,3
	Máximo	510,1	65,4	179,7	26,2	183,3	25,1	82,0	10,3	827,8
50,0 – 59,9	Mínimo	395,6	47,1	143,9	14,6	29,5	4,9	26,4	4,4	602,7
	Médio	558,1	54,4	201,1	19,6	203,9	19,9	63,5	6,2	1026,6
	Máximo	701,6	65,6	268,9	25,1	313,0	26,8	100,1	8,0	1273,6
60,0 – 69,9	Mínimo	691,8	51,3	236,3	16,6	266,3	19,5	52,4	3,0	1329,7
	Médio	819,7	52,9	297,4	19,2	334,1	21,6	97,1	6,3	1548,2
	Máximo	941,7	54,0	356,7	20,4	394,8	24,2	113,3	8,5	1745,6
MÉDIA PONDERADA		514,7	55,0	185,4	19,8	178,6	19,1	57,1	6,0	935,8

Estudando a produção de biomassa total em um povoamento de *A. angustifolia* com 27 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, estado do Paraná, Schumacher et al. (2011) encontraram uma produção média individual de 778,6 kg.ind<sup>-1</sup>, incluindo 105,6 kg.ind<sup>-1</sup> correspondentes a biomassa das raízes (13,6% do total). A biomassa aérea individual encontrada foi de 672,9 kg.ind<sup>-1</sup>, sendo 402,9 kg.ind<sup>-1</sup> referentes ao lenho do fuste, o que corresponde a 59,9% da biomassa aérea, 101,0 kg.ind<sup>-1</sup> (15,0% - galhos) 100,6 kg.ind<sup>-1</sup> (14,9% - casca do fuste) e 68,4 kg.ind<sup>-1</sup> (10,2% - grimpas).

Caldeira et al. (2015) avaliando a produção de biomassa aérea em um povoamento de *A. angustifolia* com idade variando entre 23 e 32 anos, em General Carneiro, estado do Paraná, encontraram uma produção aérea média individual de 369,5 kg.ind<sup>-1</sup>, sendo 50,5% referentes ao lenho do fuste, 24,3% à casca do fuste, 16,5% aos galhos e 8,7% às grimpas. Em relação ao carbono orgânico acumulado, os referidos autores encontraram uma produção aérea média individual de 156,8 kg.ind<sup>-1</sup>, sendo 52,4% referentes ao lenho do fuste, 23,0% à casca do fuste, 16,3% aos galhos e 8,3% às grimpas.

No que concerne à biomassa total de um povoamento de *A. angustifolia*, com 30 anos de idade em General Carneiro, estado do Paraná, Watzlawick et al. (2003) encontraram 563,3 kg.ind<sup>-1</sup>, incluindo 88,7 kg.ind<sup>-1</sup> referentes às raízes (15,7% do total). Em relação à biomassa aérea, 48,3% correspondem ao lenho do fuste, 28,3% à casca do fuste, 15,2% aos galhos e

8,2% às grimpas. Em relação aos quantitativos de carbono fixados, os percentuais encontrados foram: lenho do fuste (50,0%), casca do fuste (26,6%), galhos (15,0%) e grimpas (8,4%) de um total de 245,4 kg.ind<sup>-1</sup>.

Observa-se que os valores médios absolutos de biomassa aérea e carbono orgânico encontrados no presente estudo são superiores aos resultados obtidos em estudos realizados em povoamentos da mesma espécie (WATZLAWICK et al., 2003; SCHUMACHER et al., 2011; CALDEIRA et al., 2015) devido, principalmente, a diferença de idade e, conseqüentemente, ao tamanho dos indivíduos. Segundo Cromer et al. (1975) e Schumacher e Caldeira (2001), a produção de biomassa tende a aumentar com a idade e, de modo geral, a idade (GONÇALVES et al., 2004) e o espaçamento (LADEIRA et al., 2001) são os fatores que mais interferem na distribuição da biomassa entre os diferentes componentes das árvores.

De qualquer forma, analisando os componentes separadamente, a distribuição percentual de biomassa aérea da araucária seguiu a mesma ordem observada para o acúmulo de carbono orgânico, ou seja, LENHO DO FUSTE > CASCA DO FUSTE > GALHOS > GRIMPA, corroborando os resultados obtidos por Watzlawick et al., (2003); Sanquetta et al. (2003); Schumacher et al. (2011) e Caldeira et al. (2015).

Comparando os resultados obtidos à outra conífera, o *Pinus taeda* L., Schumacher et al. (2013) estimaram o lenho do fuste em 69,1% e a casca do fuste em 6,7% da biomassa aérea em um povoamento de 27 anos de idade em Cambará do Sul, estado do Rio Grande do Sul. Para a mesma espécie, Watzlawick et al. (2013) estimaram em 65,6% e 12,3% a biomassa do lenho e casca do fuste, respectivamente, em um povoamento com idade variando entre 14 e 32 anos em General Carneiro, Paraná. Desse modo, é possível afirmar que *A. angustifolia* é uma espécie que apresenta menor acúmulo relativo de biomassa no lenho do fuste em comparação à *P. taeda*, o que em parte, está relacionado à maior alocação relativa na casca. Neste estudo, verificou-se um acúmulo de biomassa na casca do fuste de 19,7%.

Os resultados obtidos por Sanquetta et al. (2003), em povoamentos de *P. taeda* e *A. angustifolia*, Watzlawick et al. (2003) para *A. angustifolia* e Watzlawick et al. (2013) para *P. taeda* também corroboram esse padrão de alocação para as duas espécies.

Os valores percentuais de carbono orgânico foram muito próximos aos de biomassa aérea, o que é explicado pela pequena variação do teor de carbono nos diferentes componentes, os quais são apresentados juntamente com os teores de umidade para cada componente avaliado (TABELA 4).

TABELA 4 – TEORES DE CARBONO E UMIDADE DE *Araucaria angustifolia*, POR CLASSE DE DAP, PARA CADA COMPONENTE AVALIADO.

Classe de DAP (cm)		TEOR DE UMIDADE (%)			TEOR DE CARBONO (%)			
		FUSTE COM CASCA	GALHOS	GRIMPAS	LENHO	CASCA	GALHOS	GRIMPAS
40,0 – 49,9	Mínimo	46,8	44,0	51,2	43,9	43,4	43,6	43,5
	Médio	51,4	53,5	57,7	44,1	44,3	44,1	44,1
	Máximo	54,8	57,8	66,7	44,4	44,5	44,5	44,5
50,0 – 59,9	Mínimo	49,1	47,6	51,5	43,4	44,1	43,5	43,1
	Médio	52,8	53,9	56,3	43,9	44,3	44,1	44,0
	Máximo	55,2	56,5	62,5	44,6	44,5	44,7	44,7
60,0 – 69,9	Mínimo	51,2	51,3	47,7	43,5	44,1	43,3	43,1
	Médio	52,8	52,1	53,6	43,6	44,3	43,7	43,7
	Máximo	53,8	52,9	61,5	43,8	44,4	44,1	44,1
MÉDIA PONDERADA		52,2	53,5	56,5	44,0	44,3	44,0	44,0

Observa-se que os teores de carbono apresentaram pouca variação entre os diferentes componentes, sendo que o lenho do fuste, galhos e grimpas apresentaram o mesmo teor médio (44,0%). O componente casca do fuste apresentou o maior percentual de carbono orgânico, correspondendo a 44,3% da biomassa seca. Os teores de carbono obtidos neste estudo são similares aos de outros trabalhos, todavia diferem na ordem de acumulação entre alguns dos componentes analisados, em especial, à casca do fuste. Weber et al. (2003) encontraram os teores de carbono orgânico na seguinte ordem: lenho do fuste (44,1%), grimpas (44,0%), galhos (41,7%) e casca do fuste (40,1%). Dallagnol et al. (2011) descreveram os seguintes percentuais: lenho do fuste e grimpas (45,3%), galhos (44,5%) e casca (43,1%). Watzlawick et al. (2011) encontraram os seguintes teores: lenho do fuste (43,4%), galhos (43,3%), acículas (42,5%), e casca do fuste (39,4%).

Segundo Gonçalves et al. (2004), maiores diferenças quanto às necessidades totais de nutrientes são mais frequentes entre espécies do que entre variações genotípicas de uma mesma espécie. Contudo, Barros e Novais (1996) afirmaram que a nutrição da planta e o consequente aumento de

acúmulo de biomassa, é melhor determinado pela distribuição das chuvas que influenciam a disponibilidade de água no solo, bem como uma melhor disponibilidade de nutrientes.

Os teores médios de umidade para o fuste com casca, galhos e grimpas foram, respectivamente, 52,2%, 53,5% e 56,5%. Isso significa que, com base nos valores médios de biomassa aérea (verde e seca), as araucárias com DAP  $\geq 40$  cm acumulam em sua estrutura aérea, em média, 2376,6 litros.ind<sup>-1</sup> de água (considerando a densidade da água igual a 1 g.cm<sup>-3</sup>), sendo 1741,0 litros.ind<sup>-1</sup> no lenho e casca do fuste, 472,3 litros.ind<sup>-1</sup> nos galhos e 163,3 litros.ind<sup>-1</sup> nas grimpas. Teores de umidade similares aos apresentados foram descritos por Watzlawick et al. (2003) em um povoamento dessa espécie localizado em General Carneiro, Paraná.

A relação entre o volume, idade e biomassa aérea de cada componente pode ser visualizada na FIGURA 2. Diferente do que ocorre entre o volume e a idade em povoamentos equiâneos onde, o aumento da idade acarreta no aumento do volume individual (Figueiredo Filho et al., 2015), em fragmentos nativos essa relação nem sempre ocorre, devido a todos os fatores que influenciam o crescimento das árvores, em especial àqueles relacionados à competição com indivíduos adjacentes, principalmente por espaço, luz, água e nutrientes. Foi observado, por exemplo, para as idades de 87 e 106 anos, um volume individual de 3,7 e 1,4 m<sup>3</sup>.ind<sup>-1</sup>, respectivamente.

As biomassas referentes aos componentes galhos e grimpas, mesmo indicando uma relação positiva com o volume, apresentaram muitas oscilações. Nesse sentido, as condições que afetam o crescimento da copa apresentam maior influência na quantidade total de biomassa desses componentes em comparação à produção em volume.

Para Lamprecht (1990), o crescimento das árvores é definido pela composição genética da espécie e pode ser influenciado pelas características desta interagindo com o ambiente. De acordo com Husch et al. (1982), as influências ambientais incluem fatores climáticos (temperatura, precipitação, vento e exposição solar), fatores pedológicos (características físicas e químicas, umidade e microrganismos), características geomorfológicas (inclinação, exposição, elevação e forma) e competição (influências de outras árvores, sub-bosque e animais).

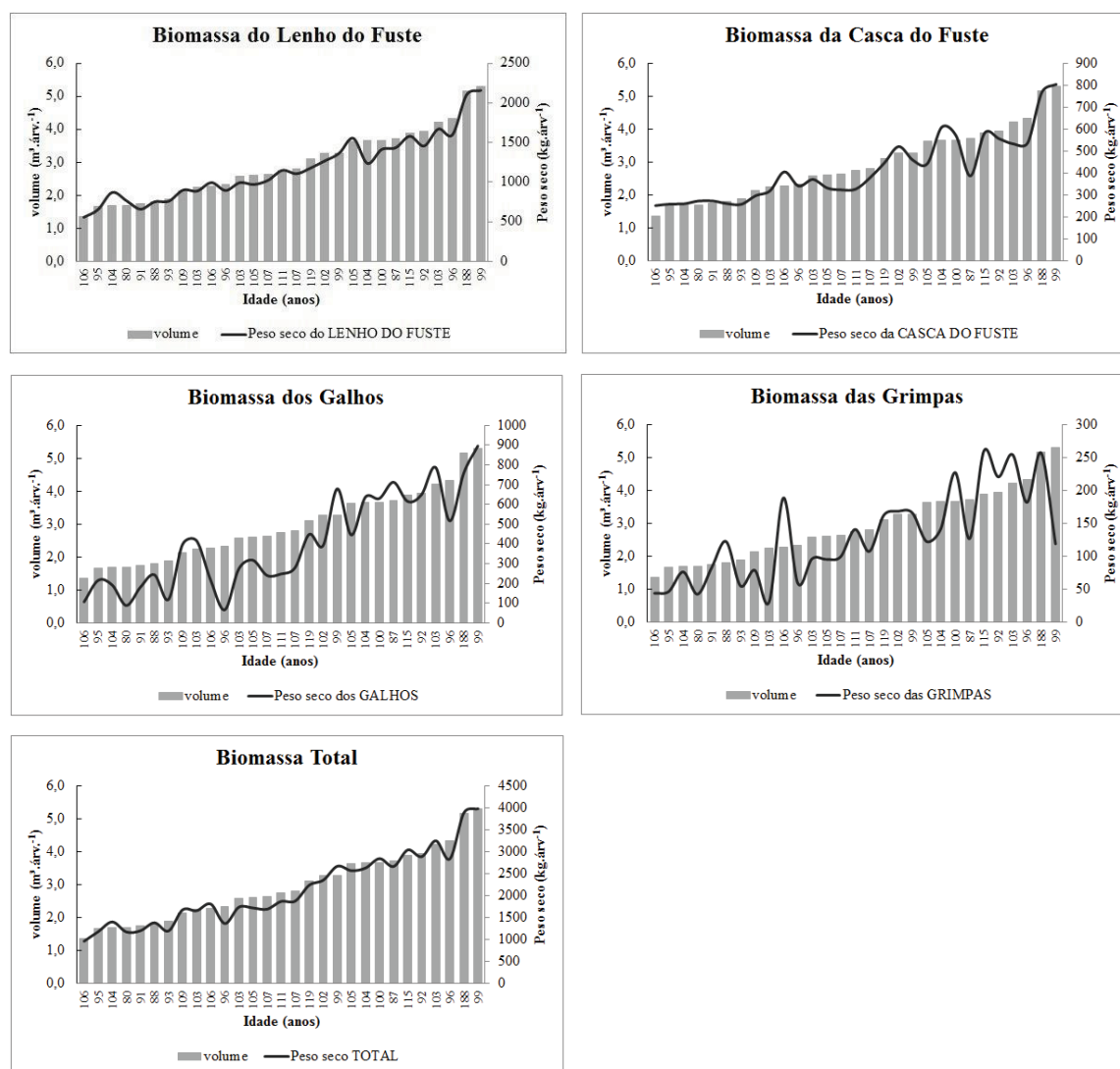


FIGURA 2 – IDADE, VOLUME E BIOMASSA INDIVIDUAL TOTAL E POR COMPONENTE DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze.

Observa-se que a biomassa do lenho e casca do fuste e o volume apresentam a mesma tendência de crescimento, ou seja, o aumento do volume acarreta em uma maior quantidade de biomassa seca do fuste. Todavia, algumas árvores com maior volume apresentaram menor biomassa destes componentes. Nesses casos, a idade e a densidade da madeira fazem com que indivíduos com menor ou igual volume, porém, com maior idade e, consequentemente, maior densidade da madeira (HIGA et al. 1973; BRASIL et al., 1980) apresentem maior biomassa referentes a estes componentes.

Estudando a produção de biomassa aérea em Floresta Ombrófila Mista Montana em General Carneiro, Paraná, Caldeira et al. (2004) encontraram um total de 210,4 t.ha<sup>-1</sup>. Desse total, a espécie *A. angustifolia* contribuiu com

23,8% da biomassa aérea. Baseando-se no valor médio de biomassa aérea obtido no presente trabalho, seriam necessários, respectivamente, 99 ind.ha<sup>-1</sup> e 24 ind.ha<sup>-1</sup> da espécie, para acumular a biomassa aérea equivalente a da referida fitofisionomia e ao percentual relativo à espécie *A. angustifolia*, respectivamente.

Os fragmentos florestais apresentam uma grande variação, tanto em sua estrutura como em sua composição. Nesse sentido, observa-se uma grande variação na densidade da espécie *A. angustifolia* em diferentes fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, sendo encontrados desde 42 ind.ha<sup>-1</sup> (FIGUEIREDO FILHO et al., 2010), 57 ind.ha<sup>-1</sup> (BECKERT et al., 2014), até 128 ind.ha<sup>-1</sup> e 165 ind.ha<sup>-1</sup> (SANQUETTA et al., 2003). Deve-se, portanto, tomar cuidado no uso de resultados obtidos para diferentes tipos florestais e condições daquelas que estarão sendo comparadas ou mesmo estimadas. Koehler et al. (2005) avaliando diferentes métodos para determinação do acúmulo de biomassa e carbono comentaram que o ideal é ter um modelo matemático para cada tipo florestal e para cada sítio, sendo que a utilização de modelos matemáticos é válida somente para as condições estudadas e consideradas, pois os resultados podem variar entre os diferentes tipos de vegetação, bem como para outros métodos de determinação das variáveis (biomassa e carbono orgânico).



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Indivíduos nativos de *A. angustifolia* acumulam uma grande quantidade de biomassa e carbono em sua estrutura, sendo a maior alocação observada no componente lenho do fuste, seguido pelos componentes casca do fuste, galhos e grimpas.

O grande acúmulo de biomassa e carbono por árvores nativas de *A. angustifolia*, apresentado nessa pesquisa, deve subsidiar a obtenção de créditos de carbono como incentivo a conservação da espécie e dos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista.

Em função das diferenças na composição e estrutura nos diferentes fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, deve-se ter o cuidado com o uso de resultados obtidos em diferentes formações e condições daquelas correspondentes à área sob estimativa. Nesse sentido, a predição da biomassa e do carbono em fragmentos de Floresta com Araucária deve considerar, separadamente, a espécie *A. angustifolia* das demais, dada a importância da espécie na composição dessa unidade fitogeográfica.

O fator idade não resulta, necessariamente, em uma maior produção em volume ou de biomassa e carbono em fragmentos nativos.

As biomassas do lenho e casca do fuste apresentaram uma relação positiva com o volume, sendo que indivíduos com volumes semelhantes, porém com idade superior, apresentaram maior biomassa desses componentes, devido à maior densidade do lenho e casca do fuste.

As biomassas dos galhos e grimpas, mesmo indicando uma relação positiva com o volume, apresentaram muitas oscilações. Nesse sentido, os fatores que afetam o crescimento da copa têm maior influência na quantidade total de biomassa desses componentes em comparação aos fatores volume e idade. Os teores de umidade e carbono orgânico pouco variaram entre as classes diamétricas e os componentes avaliados.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, M. M.; CHAMI, L.; LONGHI, S. J.; AVILA, A. L.; BRENA, D. A. Análise de agrupamento em remanescente de Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 1-18, 2010.
- BALBINOT, R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; MARCENE, E. A. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 232-237, 2009.
- BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M. A. (Eds.). **Nutrition of eucalyptus**. Collingwood, VIC: CISRO, 1996. p. 335-356.
- BECKERT, S. M.; ROSOT, M. A. D.; ROSOT, N. C. Crescimento e dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. em fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 209-218, 2014.
- BRASIL, M. A. M.; NICOLLELO, N.; VEIGA, R. A. A. Variação da densidade básica da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede em diversas idades na região de Agudos - SP. **Floresta**, Curitiba, v.11, n.1, p. 33-39, 1980.
- CALDEIRA, M. V. W.; SOARES, R. V.; WATZLAWICK, L. F. Estimativa de biomassa em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista Montana – General Carneiro – PR. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 1, n. 3, p. 291-310, 2004.
- CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F.; VIERA, M.; BALBINOT, R.; CASTRO, K. C. Biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 1027-1034, 2015.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; NETO, R. M. R.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, E. M. Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* De Wild., Procedência Batemans Bay – Austrália. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 79-91, 2001.
- CROMER, R. N.; RAUPACH, M.; CLARKE, A. R. P.; CAMERON, J. N. Eucalyptus plantations in Australia. The potential for intensive production. **Appita**, v. 29, p. 165-173, 1975.
- DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.
- DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, Washington, v. 263, p. 185-190, 1994.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. NOAA/ESRL. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 8 ago. 2017.

FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 763-776. 2010.

FIGUEIREDO FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; KOHLER, S. V.; BECKER, M.; BRANDES, D. Efeito da idade no afilamento e sortimento em povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 50-59, 2015.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 13-64.

HIGA, A. R.; KAGEYAMA, P. Y.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *P. elliotii* var. *elliotii* e *P. taeda*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n.7, p.79-91, 1973.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD/FBDS, 1994. p.125-145.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest Mensuration**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1982.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: 1992. 92 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n.1).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=410773>>. Acesso em 22 ago. 2017.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance for land-use, land-use change and forestry**. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. 2003. 675p.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; VALÉRIO, A. F. Fontes de erros nas estimativas de biomassa e carbono fixado na Floresta Ombrófila Mista. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 69-77, 2005.

LADEIRA, B. C.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos em uma sequência de idade. **Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 69-78, 2001.

LAMPRECHT H. **Silvicultura nos trópicos**. Eschborn: GTZ; 1990. 343p.

LECO. **C-144 Carbon Determinator**. Specification Sheet 209-134-003. LECO Corporation, 2008. 2p.

MOGNON, F.; DALLAGNOL, F. S.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BARRETO, T. G. Uma década de dinâmica de fixação de carbono na biomassa arbórea em Floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 153-164, 2013.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (eds.). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 p. 2014a.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. ASSAD, E. D.; MAGALHÃES, A. R. (eds.). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 p. 2014b.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 119-140.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; EISFELD, R. L. Crescimento, mortalidade e recrutamento em duas florestas de Araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.) no estado do Paraná, Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 101-112, 2003.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 1-8, 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 33-40. 2003.

SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. On the use of data mining for estimating carbon storage in the trees. **Carbon Balance Management**, v. 8, n. 6, p. 1-9, 2013.

SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Comparison of data mining and allometric model in estimation of tree biomass. **BMC Bioinformatics**, v. 16, n. 1, p. 1-9, 2015.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. **Ambiência**, v. 4, n. 3, p. 529-549, 2008.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul - RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 321-332, 2013.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G.; VIERA, M. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 53-62, 2011.

SEDJO, R. A. Temperature Forest ecosystem in the global carbon cycle. **Ambio**, Stockholm, v. 21, N. 4, p. 274-277, 1992.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.1, p.185-206, 2008.

SOCHER, L. G.; RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F. Biomassa aérea de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial no município de Araucária (PR). **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 245-252, 2008.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma Floresta Estacional Decidual em Itaara, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.4, p.419-425, 2006.

WATSON, C. **Forest carbon accounting**: overview and principles. London: UNDP/UNEP, 2009. 39p.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; GODINHO, T. O.; BALBINOT, R.; TRAUTENMULLER, J. W. Aboveground stock of biomass and organic carbon in stands of *Pinus taeda* L. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 509-515, 2013.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. O.; BALBINOT, R. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana, Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n.95, p. 353-362, 2012.

WATZLAWICK, L. F.; EBLING, A. A.; RODRIGUES, A. L.; VERES, Q. J. I.; LIMA, A. M. Variação nos teores de carbono orgânico em espécies arbóreas da

Floresta Ombrófila Mista. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 248-258, 2011.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de Carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUFEP, 2002. p. 153-190.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Kuntze no Sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p. 63-68, 2003.

WEBER, K. S.; SANQUETTA, C. R.; MELLO, A. A.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R. Variação nos teores de carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 22, n. 76, p. 23-28, 2003.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER, J. C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 336p.



## CAPÍTULO 2

### MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA DE ÁRVORES NATIVAS DE

*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

#### RESUMO

O objetivo da presente pesquisa foi avaliar o desempenho da modelagem simultânea em comparação à modelagem independente dos componentes (lenho do fuste, casca do fuste, galhos e grimpas) e da biomassa aérea total de árvores nativas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, bem como avaliar o efeito de variáveis morfométricas, qualitativas e a idade das árvores, além do diâmetro e altura na estimativa da biomassa. A modelagem foi realizada com base nos dados de biomassa aérea obtidos pelo método direto em 29 indivíduos nativos da espécie, localizados em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana no município de Fernandes Pinheiro, Paraná. Foram ajustados modelos tradicionais da literatura que apresentam como variáveis independentes o diâmetro e a altura e/ou uma variação destes. Para avaliar os efeitos das variáveis morfométricas, qualitativas e a idade das árvores na modelagem foram desenvolvidas equações pelo procedimento *stepwise*, sendo os efeitos diretos e indiretos das variáveis selecionadas, avaliados pela análise de coeficiente de trilha. A avaliação dos ajustes foi realizada empregando-se o coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa absoluto e relativo, critério de informação de Akaike, critério de informação Bayesiano e análise gráfica dos resíduos. A modelagem da biomassa foi realizada por duas diferentes técnicas, (i) ajuste independente, que desconsidera o princípio da aditividade; (ii) ajuste simultâneo, o qual considera o princípio da aditividade. Os modelos tradicionais e *stepwise* apresentaram estatísticas de ajustes satisfatórias aos dados do estudo. Os modelos *stepwise* melhoraram as estatísticas de ajuste para os componentes lenho e casca do fuste, galhos e biomassa aérea total. O produto entre o quadrado do diâmetro e a altura total ( $d^2h$ ) apresentou forte correlação positiva com os componentes lenho do fuste, galhos e biomassa aérea total. A variável índice de saliência ( $Is$ ) apresentou baixa correlação com os componentes avaliados, em virtude dos efeitos indiretos negativos com as variáveis ( $d^2h$ ) e altura de início da copa ( $hic$ ). A altura de início de copa, apesar da baixa correlação com o componente galhos, apresentou elevado efeito indireto, indicando que tal variável não deve ser usada isoladamente para estimar a biomassa dos galhos, mas têm papel importante quando associada as variáveis ( $d^2h$ ) e ( $Is$ ). A abordagem simultânea não resultou em expressivas mudanças nas estatísticas de ajuste das equações quando comparada à abordagem independente, todavia tem como vantagem a garantia da aditividade, menores intervalos de confiança dos coeficientes e, conseqüentemente, estimadores mais eficientes, sendo esta a abordagem mais adequada para a estimativa da biomassa total e dos respectivos componentes.

**Palavras-chave:** aditividade; ajuste independente; ajuste simultâneo; componentes da biomassa.

## CHAPTER 2

### MODELING OF THE ABOVEGROUND BIOMASS OF *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze NATIVE TREES

#### ABSTRACT

The aims of the present study were to evaluate the performance of the simultaneous modeling in comparison to the independent modeling of the components (stem wood, stem bark, branches and leaves) and total aerial biomass of native trees of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, as well as to evaluate the effect of morphometric and qualitative variables and the age of the trees, besides the diameter and height in the biomass estimation. The modeling was carried out based on the aboveground biomass data obtained by the direct method in 29 native trees of the species, located in a fragment of Mixed Ombrophilous Forest in Fernandes Pinheiro, Paraná. Traditional models of the literature were adjusted that present as independent variables the diameter and height or a variation of these. To evaluate the effects of morphometric and qualitative variables and the age of the trees in the modeling, equations were developed by the *stepwise* procedure and the direct and indirect effects of the selected variables were evaluated by the path analysis. The evaluation of the adjustments was carried out using the adjusted coefficient of determination, absolute and relative standard error, Akaike information criterion, Bayesian information criterion and graphical analysis of the residuals. The biomass modeling was performed by two different techniques, (i) independent adjustment, which does not consider the additivity principle; (ii) simultaneous adjustment, which consider the additivity principle. The traditional and *stepwise* models presented satisfactory adjustment statistics to the study data. The *stepwise* models improved the adjustment statistics for the wood and bark of the stem, branches and total aerial biomass. The product between the square of the diameter and the total height ( $d^2h$ ) presented a strong positive correlation with the wood of the stem, branches and total aerial biomass. The variable slenderness index ( $Is$ ) showed low correlation with the evaluated components, due to the negative indirect effects with the variables ( $d^2h$ ) and height of the beginning of the crown ( $hic$ ). The height of the beginning of the crown, even with the low correlation with the branches component, presented a high indirect effect, indicating that this variable should not be used alone to estimate the biomass of the branches, but it is important when associated with the variables ( $d^2h$ ) and ( $Is$ ). The simultaneous approach did not result in significant changes in the equation adjustment statistics when compared to the independent approach, but has the advantage of additivity, lower confidence intervals of the coefficients and, consequently, more efficient estimators, being this the most appropriate approach for estimating of the total biomass and its components.

**Keywords:** additivity; biomass components; independent adjustment; simultaneous adjustment.



## 1 INTRODUÇÃO

*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze é uma conífera pertencente a família Araucariaceae endêmica nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (YAMAGUCHI; KATO, 2012), sendo juntamente às espécies do gênero *Podocarpus* as únicas gimnospermas arbóreas nativas no território brasileiro (ASTARITA et al., 2003). É popularmente conhecida como “araucária”, “pinheiro”, “pinheiro do Paraná” ou “pinheiro brasileiro” sendo a principal componente da Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como “Floresta com Araucária”, unidade fitogeográfica pertencente ao Bioma Mata Atlântica (IBGE, 2009).

A Floresta Ombrófila Mista é uma das principais unidades fitogeográficas da região Sul do país. Atualmente, encontra-se distribuída de forma descontínua, fragmentada e quando presente, em geral, nas pequenas propriedades rurais, está em sua maioria degradada e empobrecida quanto à diversidade original típica que caracterizava a floresta, notadamente em relação às espécies com elevado potencial madeireiro, exploradas seletivamente no passado.

A araucária foi, durante anos, extensivamente explorada, devido à boa qualidade de sua madeira para construções e do alto teor de celulose para fabricação de papel, de modo que na década de 1980 suas reservas naturais já estavam reduzidas consideravelmente (SILVA et al., 2001). A espécie está enquadrada na categoria “em perigo” na Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção, conforme Portaria MMA nº 443, de 17 de dezembro de 2014 (BRASIL, 2014), devido à intensa exploração de sua madeira, ao grande consumo de suas sementes e a ineficácia das leis que visam sua conservação.

Grande parte dos remanescentes da Floresta com Araucária está localizada em propriedades privadas, sendo que tal vegetação não pode ser manejada por força da legislação atual e, portanto, não agrega rendimento direto aos proprietários, além de diminuir a área potencial de cultivo. Essa restrição da lei que objetiva preservar tem tido na verdade, um efeito contrário, constatando-se um avanço paulatino e permanente sobre a floresta e, a conversão desta, em culturas agrícolas e/ou áreas de pastagens.

Algumas estratégias e ações que visam à conservação da araucária por meio de seu manejo sustentável foram recentemente desenvolvidas, todavia os resultados de tais pesquisas ainda não são conhecidos devido às dificuldades inerentes a este tipo de estudo, quer seja pelo tempo necessário à obtenção dos resultados, quer seja pela dificuldade na obtenção de licença ambiental para intervenção nos remanescentes nativos. Nesse sentido, alternativas para a conservação dos remanescentes florestais devem ser desenvolvidas de modo que possam fomentar a conservação ambiental e o desenvolvimento sustentável, como é o caso de projetos que visam o pagamento por serviços ambientais (PSAs).

De acordo com Parron et al. (2015), a incorporação do conceito de serviços ambientais no Brasil tem sido feita em escalas local e regional, gerando resultados animadores sobre PSAs, políticas públicas de incentivos à manutenção e produção de serviços ambientais. Além disso, tem funcionado como um incentivo para a gestão sustentável dos recursos naturais e melhoria do bem-estar da sociedade. Experiências bem sucedidas de PSAs no Brasil são descritas em Hercowitz et al. (2011) e Santos e Vivan (2012). Nelas, esses autores ressaltaram o papel dessa ferramenta como parte de uma combinação de políticas públicas em várias escalas e o potencial desse mecanismo para criar e desenvolver mercados para serviços ambientais e promover a participação voluntária de fornecedores ou compradores desses serviços.

A capacidade das florestas de absorver carbono do dióxido de carbono atmosférico está entre os serviços que regulam as condições ambientais (PARRON et al., 2015). Nesse sentido, tem crescido o interesse a respeito da quantificação da biomassa florestal, principalmente pelo potencial de armazenamento do carbono atmosférico nas florestas, diante do crescimento das emissões em todo mundo e ao cenário de mudanças climáticas (DIXON et al., 1994; HOUGHTON et al., 2000; FANG et al., 2001; HOUGHTON, 2005; KINDERMANN et al., 2008; KURZ et al., 2008; LINDNER et al., 2010; MANDAL et al., 2013; ALAM; NIZAMI, 2014).

O método mais preciso para avaliar a biomassa de uma árvore é a pesagem dos componentes, mas isso implica em atividades onerosas e de alto custo, além do corte de árvores. Uma abordagem alternativa é o emprego de equações alométricas, ou seja, variáveis medidas biometricamente são

convertidas em valores de biomassa por meio de modelos alométricos empíricos (BROWN, 1997).

Em relação à estimativa de biomassa de árvores, a alometria corresponde às equações matemáticas relacionadas à biomassa em função de variáveis de mais simples obtenção que a própria biomassa, tais como: diâmetro à altura do peito, altura da árvore, densidade da madeira e diâmetro da copa. De acordo com Chave et al. (2014) as equações devem ser baseadas em amostragem destrutivas para depois serem aplicadas genericamente.

De maneira geral, a avaliação da biomassa de árvores é realizada em função de seus componentes biológicos. Assim, a biomassa total das árvores pode ser dividida em dois componentes principais: (i) biomassa acima do solo, que inclui fuste, casca, galhos, folhas e frutos; (ii) biomassa abaixo do solo, que corresponde às raízes, podendo, ainda, ser subdividido em raízes grossas e raízes finas.

O método de ajuste geralmente utilizado para desenvolver equações de biomassa para os componentes e para a biomassa total é aquele no qual utiliza-se um estimador de uma única equação (estimador independente), sendo usada, assim, cada uma das equações para estimar, independentemente, as biomassas dos componentes e do total. Todavia, segundo Sanquetta et al. (2015), ao se utilizar esse tipo de equação, a soma dos componentes de biomassa não produz o mesmo resultado que o obtido usando a equação total da biomassa, gerando resultados inconsistentes, ao que se denomina falta de aditividade. Conforme Chiyenda e Kozak (1984) é pouco realista considerar que os componentes de uma mesma árvore são independentes entre si.

De acordo com Sanquetta et al. (2015), a soma das estimativas dos componentes de biomassa deve resultar no mesmo valor que o estimado a partir da equação total da biomassa. Isso implica que as equações para componentes de biomassa e biomassa total devem ser estimadas em conjunto. A estimativa simultânea, considerando o princípio de aditividade (KOZAK, 1970; REED; GREEN, 1985), é uma técnica que pode ser usada para resolver a inconsistência nessas estimativas.

Zellner (1962) propôs a abordagem de regressões aparentemente não relacionadas (*seemingly unrelated regressions* – SUR), que utiliza estimativa

simultânea. Esta técnica fornece um sistema estatisticamente correlacionado de equações com restrições, na qual o ajuste das equações para os componentes da biomassa e para a biomassa total impõe restrições aos parâmetros, assegurando a aditividade.

Parresol (1999) pesquisou três procedimentos para garantir a aditividade de equações lineares de biomassa e Parresol (2001) dois procedimentos para equações não lineares. Em suas pesquisas, esse autor concluiu que o procedimento SUR para funções lineares e o procedimento regressões não lineares aparentemente não relacionadas (*nonlinear seemingly unrelated regressions* – NSUR) para funções não lineares, resultaram em estimadores mais eficientes para a biomassa dos componentes e para a biomassa total. Métodos específicos para garantir a aditividade das funções de regressão são apresentados por Cunia (1979) e Jacobs e Cunia (1980). O procedimento SUR é discutido extensivamente por Gallant (1987) e Srivastava e Giles (1987).

Estudos com equações alométricas aplicados à espécie *Araucaria angustifolia* são raros no Brasil e se limitam a pesquisas desenvolvidas em plantios florestais (SANQUETTA et al., 2003; BALBINOT et al., 2009; SCHUMACHER et al., 2011), sendo que estudos com indivíduos nativos da espécie ainda não foram desenvolvidos. Da mesma forma, não é frequente o uso de equações com ajuste simultâneo, cuja aplicação se restringe aos trabalhos conduzidos por Sanquetta et al. (2014), Sanquetta et al. (2015) e Coutinho et al. (2017) com as espécies *Acacia mearnsii* De Wild, *Pinus elliottii* Engelm e *Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don., respectivamente.

Diante do exposto, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar o desempenho da modelagem simultânea em comparação à modelagem independente dos componentes e da biomassa aérea total de indivíduos nativos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, bem como avaliar o efeito de variáveis morfométricas, qualitativas e a idade das árvores, além do diâmetro e altura total na modelagem da biomassa.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da modelagem simultânea em comparação à modelagem independente dos componentes e da biomassa aérea total de indivíduos nativos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, bem como avaliar o efeito de variáveis morfológicas, qualitativas e a idade das árvores, além do diâmetro e altura total na modelagem da biomassa.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Ajustar, independentemente, modelos de biomassa tradicionais da literatura, que apresentam como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito e a altura total ou variações destes, para os componentes: lenho do fuste, casca do fuste, galhos e grimpas e para a biomassa aérea total;

b) Desenvolver equações pelo procedimento *stepwise* para a estimativa da biomassa dos diferentes componentes e para a biomassa aérea total, baseando-se em variáveis morfológicas, qualitativas e na idade das árvores, além das variáveis tradicionalmente utilizadas, diâmetro e altura e suas variações;

c) Avaliar os efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes selecionadas nos modelos *stepwise* sobre a variável resposta (biomassa), por meio da análise de coeficiente de trilha;

d) Avaliar o desempenho dos modelos tradicionais em comparação às equações desenvolvidas pelo procedimento *stepwise*;

e) Avaliar o desempenho da modelagem simultânea em comparação à modelagem independente, utilizando os modelos tradicionais e as equações desenvolvidas pelo procedimento *stepwise*.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ORIGEM DOS DADOS, ÁREA DE ESTUDO E QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA

A modelagem da biomassa foi realizada com base nos dados de biomassa aérea obtidos pelo método direto em 29 indivíduos nativos da espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. A caracterização da área de estudo, bem como a metodologia utilizada para a quantificação da biomassa, está descrita no capítulo 1, item 4.

#### 3.2 MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA

A modelagem da biomassa florestal foi realizada por duas diferentes técnicas, (i) ajuste independente, que desconsidera o princípio da aditividade; (ii) ajuste simultâneo, o qual considera o princípio da aditividade. Em cada uma das abordagens foram avaliados modelos de biomassa tradicionais da literatura e também foram desenvolvidas equações pelo procedimento *stepwise*, considerando, além das variáveis independentes tradicionalmente utilizadas (diâmetro à altura do peito, altura e suas variações), variáveis morfométricas, qualitativas e a idade das árvores, de modo a avaliar o efeito dessas variáveis na modelagem da biomassa florestal em comparação àquelas empregadas nos modelos tradicionais. A modelagem foi realizada para os componentes: lenho do fuste, casca do fuste, galhos, grimpas e biomassa aérea total.

##### 3.2.1 Modelos tradicionais

Foram avaliados seis modelos tradicionais encontrados na literatura florestal (TABELA 5), os quais apresentam como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito (d), altura total (h) e/ou uma variação ou combinação destas, sendo três modelos não lineares (1 a 3) e três modelos lineares (4 a 6). Todos os modelos foram ajustados para cada componente avaliado, bem como para a biomassa aérea total.

TABELA 5 – MODELOS TRADICIONAIS AVALIADOS.

AUTOR	FUNÇÃO	ANO	MODELO
Schumacher – Hall	$y = \beta_0 d^{\beta_1} h^{\beta_2} + \varepsilon_i$	1933	(1)
Spurr	$y = \beta_0 (d^2 h)^{\beta_1} + \varepsilon_i$	1952	(2)
Berkhout	$y = \beta_0 d^{\beta_1} + \varepsilon_i$	1920	(3)
Kopecki	$y = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon_i$	1899	(4)
Meyer	$y = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 dh + \beta_4 d^2 h + \beta_5 h + \varepsilon_i$	1938	(5)
Naslund	$y = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 d^2 h + \beta_3 h^2 + \beta_4 dh^2 + \varepsilon_i$	1940	(6)

Em que:  $y$  = biomassa ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $d$  = diâmetro à altura do peito – 1,3 m (cm);  $h$  = altura total (m);  $\beta_i$  = coeficientes a estimar;  $\varepsilon_i$  = erro aleatório.

### 3.2.2 Equações desenvolvidas pelo procedimento *stepwise*

Com o objetivo de avaliar o efeito de outras variáveis, além do diâmetro, altura e suas variações, na modelagem da biomassa aérea da araucária e de seus diferentes componentes, foram desenvolvidas equações, pelo procedimento *stepwise*, considerando as seguintes variáveis:

(i) variáveis biométricas:  $d$ ,  $d^2$ ,  $dh$ ,  $d^2h$ ,  $dh^2$ ,  $dic$ ,  $h$ ,  $h^2$ ,  $hic$ ,  $Rc$ ,  $Dc$  e  $Cc$ .

em que:  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $h$  = altura total (m);  $dic$  = diâmetro no início da copa (cm);  $hic$  = altura de início da copa (m);  $Rc$  = raio de copa (m);  $Dc$  = diâmetro de copa (m);  $Cc$  = comprimento de copa (m).

(ii) variáveis morfométricas: área de projeção da copa ( $Ac$ ), porcentagem de copa ( $Pc$ ), volume de copa ( $Vc$ ), grau de esbeltez ( $Ge$ ), índice de saliência ( $Is$ ), índice de abrangência ( $Ia$ ) e formal de copa ( $Fc$ ). Os índices morfométricos foram calculados de acordo com as fórmulas apresentadas na FIGURA 3.

(iii) variáveis qualitativas: posição da copa ( $Pco$ ) e forma da copa ( $Fco$ ), apresentadas na FIGURA 4.

(iv) idade: a idade das árvores foi obtida pela contagem dos anéis de crescimento do disco retirado da base do fuste de cada indivíduo, conforme descrito no capítulo 1, item 4.



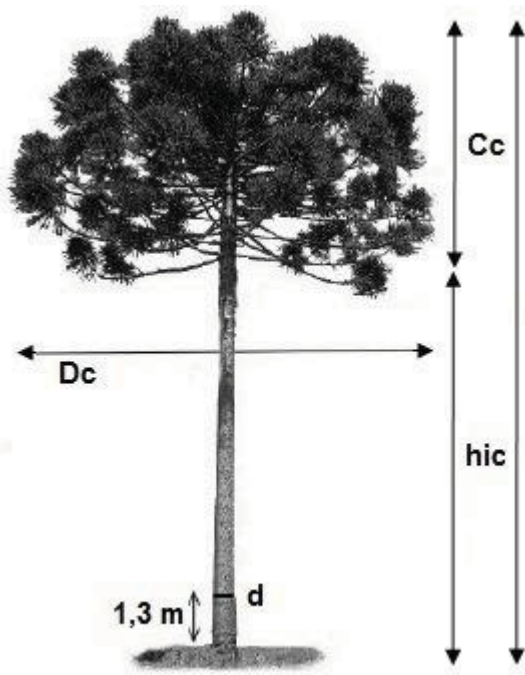
	Área de projeção da copa $A_c = \pi \cdot r^2$	(7)
	Porcentagem de copa $P_c = C_c \div h \cdot 100$	(8)
	Volume de copa $V_c = (\pi \cdot r^2 \cdot C_c) \div 3$	(9)
	Grau de esbeltez $G_e = h \div d$	(10)
	Índice de saliência $I_s = D_c \div d$	(11)
	Índice de abrangência $I_a = D_c \div h$	(12)
	Formal de copa $F_c = D_c \div C_c$	(13)

FIGURA 3 – ÍNDICES MORFOMÉTRICOS AVALIADOS.

FONTE: ADAPTADO DE Silva et al. (2017).

Em que:  $r$  = raio da copa (obtido pela média aritmética dos oito raios medidos, dado em metros);  $C_c$  = comprimento de copa (m);  $h$  = altura total (m);  $h_{ic}$  = altura de início da copa (m);  $d$  = diâmetro à altura do peito (m);  $D_c$  = diâmetro de copa (m).

A posição da copa, conforme Dawkins (1958), é determinada em função da incidência de luz. Para isso, considera-se um cone com ângulo de  $90^\circ$  a partir da base da copa. O método divide a posição da copa em cinco classes (FIGURA 4a). Na classe 5 (emergente), a superfície da copa está completamente exposta à luz no sentido vertical e está livre de competição lateral, há incidência total de luz no cone. Na classe 4 (iluminação superior completa), a parte superior da copa está completamente exposta à luz, mas ocorre sombreamento lateral de outras copas de altura igual ou maior dentro do cone. Na classe 3 (iluminação superior parcial), a superfície da copa não fica inteiramente exposta à luz no sentido vertical, pois está parcialmente sombreada por outras copas. Na classe 2 (recebe alguma iluminação natural), a superfície da copa está toda sombreada no sentido vertical, mas permanece exposta a alguma luz direta devido a uma clareira ou à extremidade de um dossel superior. Na classe 1 (sem iluminação direta), a superfície da copa está



totalmente sombreada, tanto no sentido vertical quanto lateral.

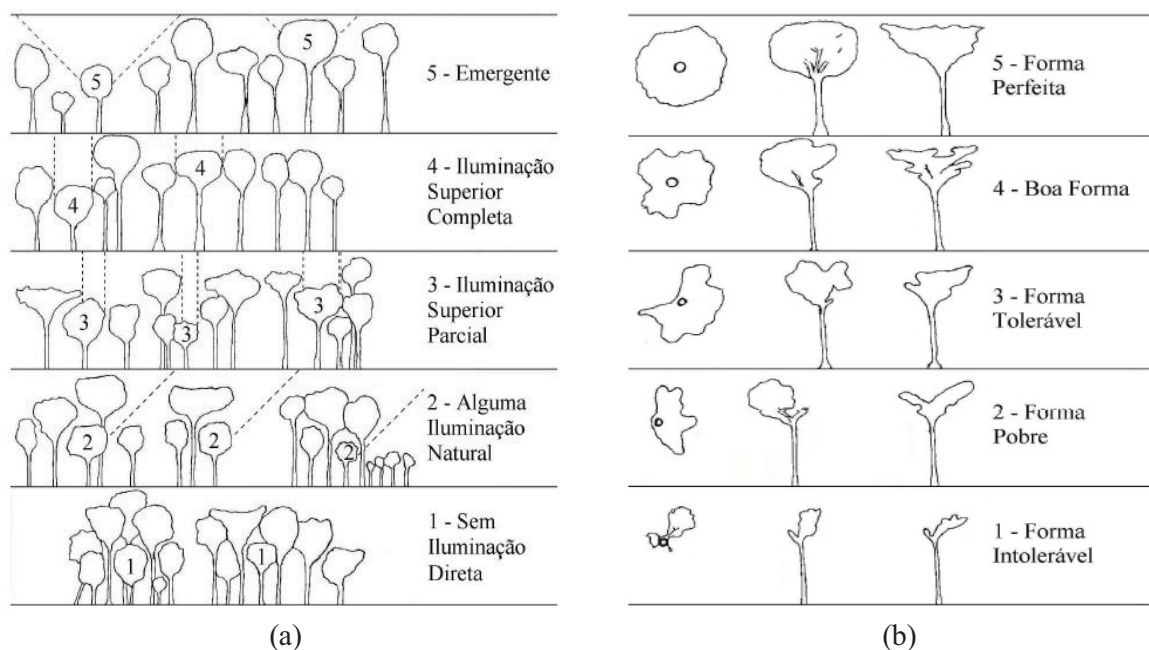


FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DA POSIÇÃO DA COPA (a) E FORMA DA COPA (b) PROPOSTA POR Dawkins (ADAPTADO DE Dawkins, 1958).

A forma da copa, ainda segundo Dawkins (1958), também é definida em cinco classes (FIGURA 4b). Classe 5 (forma perfeita): nenhuma irregularidade, tanto em perspectiva superior quanto lateral. Classe 4 (boa forma): existe pequena irregularidade no formato da copa. Classe 3 (forma tolerável): as irregularidades são maiores, porém inferiores a 50% da copa. Classe 2 (forma pobre): as irregularidades são superiores a 50% da copa. Classe 1 (forma intolerável): as irregularidades são muito grandes, podendo atingir toda a copa.

Após selecionar as equações pelo procedimento *stepwise*, foi realizado um estudo dos efeitos das variáveis selecionadas (x) sobre a variável resposta (biomassa), por meio da análise de coeficiente de trilha de acordo com Cruz et al. (2012). A correlação simples permite apenas avaliar a magnitude e o sentido da associação entre duas variáveis, mas não fornece as informações relacionadas aos efeitos diretos e indiretos de um grupo de variáveis independentes em relação a uma variável dependente. A análise de trilha (*path analysis*) permite o estudo dos efeitos diretos e indiretos das várias variáveis independentes sobre uma variável dependente, cujas estimativas são obtidas

por meio de equações de regressão em que as variáveis são primeiramente padronizadas (CRUZ et al., 2012).

### 3.3 AJUSTE INDEPENDENTE

Os seis modelos tradicionais (1 a 6) foram ajustados para cada componente avaliado e para a biomassa aérea total pelo método dos mínimos quadrados. O mesmo método foi utilizado para o ajuste independente das cinco equações geradas pelo procedimento *stepwise*, as quais correspondem a cada um dos componentes e à biomassa aérea total, totalizando, dessa forma, 35 modelos ajustados.

### 3.4 AJUSTE SIMULTÂNEO

A fim de garantir a aditividade dos componentes de biomassa da árvore, Parresol (1999) sugeriu a estimação simultânea por um sistema de equações. Essa técnica permite compatibilizar as estimativas, em que o resultado do somatório das equações de cada componente seja igual ao obtido com a equação de biomassa total. Desta forma, procedeu-se ao ajustamento simultâneo dos modelos que apresentaram melhor desempenho para cada componente de biomassa, pelo ajuste independente. Para tal, seguiu-se o procedimento sugerido por Parresol (1999), que consiste no método dos mínimos quadrados generalizados designado por *Seemingly Unrelated Regressions* (SUR) para modelos lineares e *Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* (NSUR) para modelos não lineares (PARRESOL, 2001).

Os referidos procedimentos foram processados no software *Statistical Analysis System* (SAS), com a opção ITSUR do procedimento MODEL (SAS INSTITUTE INC., 2004), com a seguinte especificação:

$$y_{\text{LENHODOFUSTE}} = f_1(X_1, \beta_1) + \varepsilon_1 \quad (14)$$

$$y_{\text{CASCADOFUSTE}} = f_2(X_2, \beta_2) + \varepsilon_2 \quad (15)$$

$$y_{\text{GALHOS}} = f_3(X_3, \beta_3) + \varepsilon_3 \quad (16)$$

$$y_{\text{GRIMPAS}} = f_4(X_4, \beta_4) + \varepsilon_4 \quad (17)$$

$$y_{TOTAL} = f_{TOTAL}(X_1, X_2, X_3, X_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) + \varepsilon_{TOTAL} \quad (18)$$

Em que:  $y_i$  = biomassa individual ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $X_i$  = variáveis independentes;  $\beta_i$  = coeficientes a estimar;  $\varepsilon_i$  = erro aleatório.

A biomassa de cada componente é estimada por uma regressão com as suas próprias variáveis independentes. Em relação à regressão para a biomassa aérea total, o valor final é resultante do somatório das funções de todos os componentes. Dessa forma, aplicaram-se as restrições aos parâmetros, em que o somatório das equações de biomassa de cada componente é igual ao resultado da equação da biomassa aérea total, garantindo, assim, o princípio da aditividade.

### 3.5 ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO

A avaliação do desempenho dos ajustes foi realizada utilizando seis diferentes critérios. Foram empregados o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa absoluto ( $S_{yx}$ ), erro padrão da estimativa relativo ( $S_{yx}\%$ ), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação Bayesiano (BIC) e análise gráfica dos resíduos.

a) Coeficiente de determinação ( $R^2$ ):

$$R^2 = r^2_{\hat{y}y} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n y \cdot \hat{y} - \frac{\sum_{i=1}^n y \cdot \sum_{i=1}^n \hat{y}}{n} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^n y^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n y \right)^2}{n} \right] \cdot \left[ \sum_{i=1}^n \hat{y}^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n \hat{y} \right)^2}{n} \right]} \quad (19)$$

b) Coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{adj}$ ):

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{(n-1)}{(n-p)} \quad (20)$$

c) Erro padrão de estimativa absoluto ( $S_{yx}$ ):

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n-p}} \quad (21)$$

d) Erro padrão de estimativa relativo ( $S_{yx}\%$ ):

$$S_{yx} = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (22)$$

e) Critério de informação de Akaike (AIC):

$$AIC = -2 \left[ \frac{-n}{2} \ln \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right) \right] + 2p \quad (23)$$

$$* AIC_c = AIC + 2p \frac{(p-1)}{n-p-1} \quad (24)$$

\*A correção do critério de informação de Akaike é necessária quando o número de observações for menor do que 12 vezes o número de parâmetros da equação (MOTULSKY; CHRISTOPOULOS, 2003).

f) Critério de informação Bayesiano (BIC):

$$BIC = -2 \left[ \frac{-n}{2} \ln \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right) \right] + \ln(n)p \quad (25)$$

g) Resíduos:

$$\text{Resíduo (\%)} = \frac{y - \hat{y}}{y} \cdot 100 \quad (26)$$

Em que:  $r^2_{yy}$  = quadrado do coeficiente de correlação entre os valores

observados e estimados;  $y$  = biomassa observada ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $\hat{y}$  = biomassa estimada ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $\bar{y}$  = média da biomassa observada ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $n$  = número de observações;  $p$  = número de parâmetros da equação;  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $e_i$  = diferença entre a biomassa observada e estimada.

## 4 RESULTADOS

Nas TABELAS 6 e 7 são apresentados, respectivamente, os coeficientes e as estatísticas de avaliação das equações tradicionais obtidas pelo ajustamento independente pelo método dos mínimos quadrados.

TABELA 6 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS OBTIDOS PELO AJUSTAMENTO INDEPENDENTE PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.

Componente	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
Lenho do fuste	Schumacher	0,0293	1,9593	0,9091			
	Spurr	0,0270	0,9671				
	Berkhout	0,1399	2,2781				
	Kopezki	-146,4353	0,4774				
	Meyer	4489,9703	-189,2586	1,9825	6,0118	-0,0471	-135,8794
	Naslund	-130,4164	-0,4260	0,0630	3,6211	-0,1237	
Casca do fuste	Schumacher	0,0160	2,1073	0,5830			
	Spurr	0,0093	0,9707				
	Berkhout	0,0444	2,3080				
	Kopezki	-55,9278	0,1719				
	Meyer	-2024,5779	90,4669	-0,9163	-4,3301	0,0502	98,2097
	Naslund	193,5759	-0,2445	0,0250	0,5174	-0,0347	
Galhos	Schumacher	0,0004	2,8838	0,7383			
	Spurr	0,0002	1,3168				
	Berkhout	0,0015	3,1454				
	Kopezki	-253,0434	0,2387				
	Meyer	10038,5190	-332,4853	2,6440	17,0147	-0,1282	-516,1563
	Naslund	229,4954	-0,2447	0,0225	-0,5881	-0,0098	
Grimpas	Schumacher	0,0063	2,2385	0,3433			
	Spurr	0,0030	0,9677				
	Berkhout	0,0104	2,3803				
	Kopezki	-34,9967	0,0598				
	Meyer	13456,9051	-545,8433	5,4639	23,5295	-0,2320	-583,9967
	Naslund	-583,6513	0,2300	0,0028	2,3736	-0,0486	
Total	Schumacher	0,0325	2,1944	0,7627			
	Spurr	0,0221	1,0387				
	Berkhout	0,1201	2,4656				
	Kopezki	-490,4115	0,9478				
	Meyer	34870,0858	-1315,8707	12,3282	56,8529	-0,4923	-1523,5792
	Naslund	-291,0730	-0,6849	0,1132	5,9229	-0,2168	

TABELA 7 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO INDEPENDENTE DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE *Araucaria angustifolia*.

Componente	Modelo	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	S <sub>yx</sub> (kg)	S <sub>yx</sub> %	AIC	BIC
Lenho do fuste	Schumacher	0,93	106,3	9,1	274,0	277,6
	Spurr	0,94	104,4	8,9	271,5	274,3
	Berkhout	0,90	130,0	11,1	284,2	287,0
	Kopezki	0,90	131,8	11,2	285,0	287,8
	Meyer	0,93	109,8	9,4	280,5	286,0
	Naslund	0,93	105,0	9,0	276,2	281,3
Casca do fuste	Schumacher	0,86	57,9	13,8	238,7	242,3
	Spurr	0,85	58,1	13,9	238,8	240,3
	Berkhout	0,85	59,6	14,2	239,0	241,8
	Kopezki	0,84	60,4	14,4	239,7	242,5
	Meyer	0,85	59,9	14,3	245,4	250,8
	Naslund	0,86	57,3	13,7	241,0	246,1
Galhos	Schumacher	0,65	139,5	34,3	289,7	293,3
	Spurr	0,66	138,2	34,0	287,8	290,5
	Berkhout	0,66	138,9	34,2	288,1	290,8
	Kopetki	0,66	137,9	34,0	287,7	290,4
	Meyer	0,63	144,7	35,6	296,5	302,0
	Naslund	0,64	142,4	35,1	293,8	298,9
Grimpas	Schumacher	0,47	49,9	38,3	230,1	233,7
	Spurr	0,48	49,3	37,9	228,1	230,8
	Berkhout	0,48	53,2	40,9	227,7	230,5
	Kopezki	0,49	52,7	40,5	227,2	229,9
	Meyer	0,61	42,8	32,9	225,9	231,4
	Naslund	0,52	47,3	36,3	229,9	235,0
Total	Schumacher	0,89	269,6	12,7	327,9	331,6
	Spurr	0,90	266,5	12,5	325,9	328,6
	Berkhout	0,88	289,6	13,6	330,7	333,4
	Kopezki	0,87	292,0	13,7	331,2	333,9
	Meyer	0,88	286,4	13,5	336,1	341,6
	Naslund	0,89	272,5	12,8	331,5	336,6

Em que: R<sup>2</sup><sub>adj</sub> = coeficiente de determinação ajustado; S<sub>yx</sub> = erro padrão de estimativa absoluto (kg.árvore<sup>-1</sup>); S<sub>yx</sub>% = erro padrão de estimativa relativo (%); AIC = critério de informação de Akaike; BIC = critério de informação Bayesiano.

Para classificar o desempenho de cada equação na estimativa da biomassa aérea total da araucária e dos respectivos componentes, foi feito o ranqueamento com base nas seguintes estatísticas de avaliação: coeficiente de determinação ajustado, erro padrão de estimativa relativo, critério de informação de Akaike e critério de informação Bayesiano. Foram atribuídos valores para cada indicador estatístico, sendo valor um (1) atribuído ao melhor desempenho e valor seis (6) ao pior desempenho, onde a melhor equação para

estimar a biomassa é aquela com o menor somatório correspondente ao respectivo componente (TABELA 8).

TABELA 8 – CLASSIFICAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS TRADICIONAIS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE *Araucaria angustifolia*.

Componente	Modelo	$R^2_{adj}$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC	$\Sigma$
Lenho do fuste	Schumacher	2	3	2	2	9
	Spurr	1	1	1	1	4
	Berkhout	3	5	5	5	18
	Kopezki	3	6	6	6	21
	Meyer	2	4	4	4	14
	Naslund	2	2	3	3	10
Casca do fuste	Schumacher	1	2	1	3	7
	Spurr	2	3	2	1	8
	Berkhout	2	4	3	2	11
	Kopezki	3	6	4	4	17
	Meyer	2	5	6	6	19
	Naslund	1	1	5	5	12
Galhos	Schumacher	2	3	4	4	13
	Spurr	1	1	2	2	6
	Berkhout	1	2	3	3	9
	Kopezki	1	1	1	1	4
	Meyer	4	5	6	6	21
	Naslund	3	4	5	5	17
Grimpas	Schumacher	5	4	6	5	20
	Spurr	4	3	4	3	14
	Berkhout	4	6	3	2	15
	Kopezki	3	5	2	1	11
	Meyer	1	1	1	4	7
	Naslund	2	2	5	6	15
Total	Schumacher	2	2	2	2	8
	Spurr	1	1	1	1	4
	Berkhout	3	5	3	3	14
	Kopezki	4	6	4	4	18
	Meyer	3	4	6	6	19
	Naslund	2	3	5	5	15

Em que:  $R^2_{adj}$  = coeficiente de determinação ajustado;  $S_{yx}\%$  = erro padrão de estimativa relativo (%); AIC = critério de informação de Akaike; BIC = critério de informação Bayesiano.

Observa-se que houve pouca variação no desempenho dos modelos para estimar a biomassa de cada componente avaliado, nesse sentido qualquer um dos modelos testados poderia ser utilizado para estimar a biomassa dos respectivos componentes. A utilização da variável altura total,



além do diâmetro, acarretou em melhoras, mesmo que pouco expressivas na estimativa da biomassa dos componentes lenho e casca do fuste, grimpas e biomassa aérea total. Já a biomassa dos galhos foi melhor estimada somente com a variável diâmetro.

O erro referente à estimativa da biomassa do lenho do fuste variou entre 8,9 e 11,2%. Em relação ao componente casca do fuste, o erro variou entre 13,7 e 14,4%. Para o componente galhos a variação foi de 34,0 a 35,6%. A maior amplitude observada corresponde ao componente grimpas, cuja variação do erro foi de 32,9 a 40,9%.

Os melhores ajustes foram observados para o lenho do fuste, seguido pelos componentes casca do fuste, galhos e grimpas. Considerando o ranqueamento proposto, os modelos selecionados para estimar a biomassa do lenho do fuste, casca do fuste, galhos e grimpas foram, respectivamente, Spurr (2), Schumacher-Hall (1), Kopezki (4) e Meyer (5).

A amplitude de erro na estimativa da biomassa aérea total variou entre 12,5 a 13,7%, sendo o modelo de Spurr (2) selecionado com o melhor desempenho com base na classificação dos modelos.

Na TABELA 9 são apresentados os modelos obtidos pelo procedimento *stepwise* para estimativa da biomassa aérea e dos respectivos componentes da araucária, sendo que os coeficientes e as estatísticas de avaliação das equações tradicionais e *stepwise* que apresentaram melhor desempenho, obtidas pelo ajustamento independente e simultâneo estão nas TABELAS 10 e 11, respectivamente.

TABELA 9 – MODELOS OBTIDOS PELO PROCEDIMENTO *STEPWISE* PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE *Araucaria angustifolia*.

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODELO
Lenho do fuste	$y = \beta_0 + \beta_1(d^2h) + \beta_2(ls) + \varepsilon_i$	(27)
Casca do fuste	$y = \beta_0 + \beta_1(d^2h) + \varepsilon_i$	(28)
Galhos	$y = \beta_0 + \beta_1(d^2h) + \beta_2(ls) + \beta_3(hic) + \varepsilon_i$	(29)
Grimpas	$y = \beta_0 + \beta_1d + \varepsilon_i$	(30)
Total	$y = \beta_0 + \beta_1(d^2h) + \beta_2(ls) + \varepsilon_i$	(31)

Em que:  $y$  = biomassa ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $d$  = diâmetro à altura do peito – 1,3 m (cm);  $h$  = altura total (m);  $hic$  = altura de início da copa (m);  $ls$  = índice de saliência;  $\beta_i$  = coeficientes a estimar;  $\varepsilon_i$  = erro aleatório.

TABELA 10 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS E STEPWISE COM MELHOR DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA TOTAL E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE *Araucaria angustifolia*, OBTIDOS PELOS AJUSTES INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO.

Componente	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
AJUSTE INDEPENDENTE							
Lenho do fuste	Spurr	0,02698	0,96714				
Casca do fuste	Schumacher	0,01603	2,10727	0,58299			
Galhos	Kopezki	-253,04344	0,23874				
Grimpas	Meyer	13456,90511	-545,84334	5,46393	23,52947	-0,23198	-583,99669
Total	Spurr	0,02214	1,03873				
Lenho do fuste	Stepwise	-164,67800	0,01800	9,61660			
Casca do fuste	Stepwise	19,81901	0,00638				
Galhos	Stepwise	-65,41918	0,01045	19,21556	-29,15544		
Grimpas	Stepwise	-205,69800	6,45300				
Total	Stepwise	-808,14063	0,03633	32,66900			
AJUSTE SIMULTÂNEO							
Lenho do fuste	Spurr	0,01853	1,00034				
Casca do fuste	Schumacher	0,00612	2,12154	0,86959			
Galhos	Kopezki	-188,40300	0,21394				
Grimpas	Meyer	10776,45000	-440,53400	4,41788	19,36267	-0,19040	-477,59400
Lenho do fuste	Stepwise	-162,43200	0,01813	9,55135			
Casca do fuste	Stepwise	20,57626	0,00631				
Galhos	Stepwise	59,67789	0,01059	19,51650	-36,70220		
Grimpas	Stepwise	-194,98700	6,19804				

TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES TRADICIONAIS E *STEPWISE* COM MELHOR DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA TOTAL E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE *Araucaria angustifolia*, OBTIDAS PELOS AJUSTES INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO.

Componente	Modelo	$R^2_{adj}$	$S_{yx}$ (kg)	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
AJUSTE INDEPENDENTE						
Lenho do fuste	Spurr	0,94	104,4	8,9	271,5	274,3
Casca do fuste	Schumacher	0,86	57,9	13,8	238,7	242,3
Galhos	Kopezki	0,66	137,9	34,0	287,7	290,4
Grimpas	Meyer	0,61	42,8	32,9	225,9	231,4
Total	Spurr	0,90	266,5	12,5	325,9	328,6
Lenho do fuste	<i>Stepwise</i>	0,94	96,4	8,2	268,3	271,9
Casca do fuste	<i>Stepwise</i>	0,86	57,9	13,9	237,3	240,0
Galhos	<i>Stepwise</i>	0,83	99,9	24,6	271,1	276,2
Grimpas	<i>Stepwise</i>	0,51	47,9	36,8	226,4	229,1
Total	<i>Stepwise</i>	0,92	228,2	10,1	318,3	321,9
AJUSTE SIMULTÂNEO						
Lenho do fuste	Spurr	0,94	105,4	9,0	272,1	274,8
Casca do fuste	Schumacher	0,85	59,0	14,1	239,8	243,4
Galhos	Kopezki	0,66	139,5	34,4	288,3	291,1
Grimpas	Meyer	0,59	46,1	35,4	230,2	235,6
Total	Modelo (18)	0,83	343,9	16,2	368,3	365,3
Lenho do fuste	<i>Stepwise</i>	0,94	96,2	8,2	268,2	271,8
Casca do fuste	<i>Stepwise</i>	0,86	58,0	13,9	237,4	240,2
Galhos	<i>Stepwise</i>	0,83	98,1	24,1	270,7	275,1
Grimpas	<i>Stepwise</i>	0,51	48,0	36,9	226,5	229,2
Total	Modelo (18)	0,93	214,9	10,1	343,2	345,3

Em que:  $R^2_{adj}$  = coeficiente de determinação ajustado;  $S_{yx}$  = erro padrão de estimativa absoluto ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $S_{yx}\%$  = erro padrão de estimativa relativo (%); AIC = critério de informação de Akaike; BIC = critério de informação Bayesiano.

Na FIGURA 5 são apresentados os gráficos de dispersão dos resíduos dos modelos tradicionais e *stepwise* com melhor desempenho para a estimativa de biomassa de cada componente avaliado, bem como da biomassa aérea total, obtidos pelo ajustamento independente e simultâneo. Os gráficos de dispersão dos resíduos de todos os modelos tradicionais, ajustados independentemente, são apresentados no APÊNDICE .

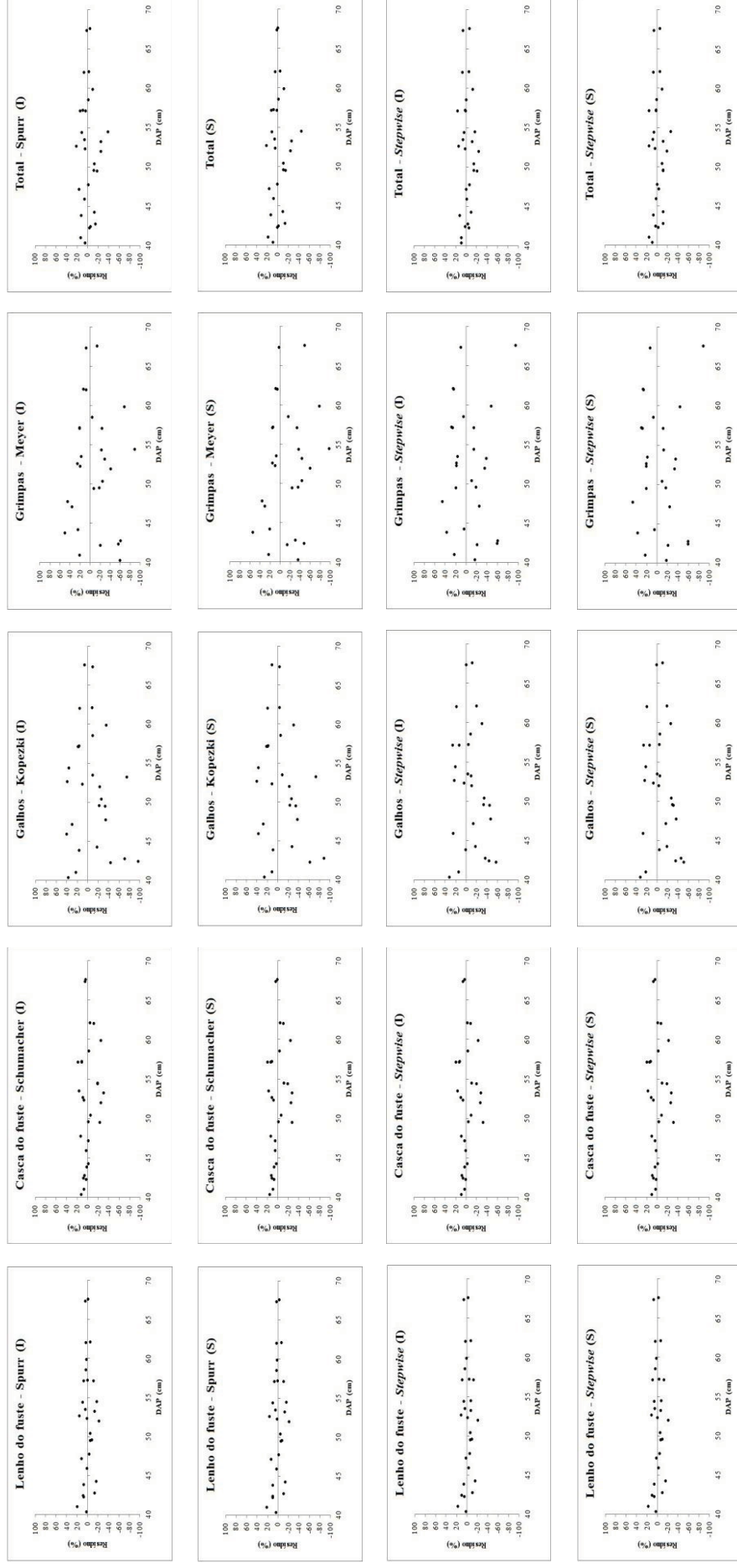


FIGURA 5 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS TRADICIONAIS E STEPWISE PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA TOTAL E RESPECTIVOS COMPONENTES DE *Araucaria angustifolia*, OBTIDOS PELOS AJUSTES INDEPENDENTE (I) E SIMULTÂNEO (S).

Conforme pode ser observado na TABELA 11, as equações obtidas pelo procedimento *stepwise* apresentaram melhores capacidades preditivas para a biomassa de todos os componentes avaliados, tanto pelo ajuste independente como pelo ajuste simultâneo, com exceção do componente grimpas, para o qual o modelo de Meyer (5) apresentou as melhores estatísticas de avaliação. Na TABELA 12 é apresentada a matriz de correlação entre as variáveis independentes selecionadas para a estimativa de biomassa e os respectivos componentes avaliados.

TABELA 12 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SELECIONADAS E A BIOMASSA DOS RESPECTIVOS COMPONENTES AVALIADOS.

	dic	d	d <sup>2</sup> h	I	hic	Is	LF	CF	GA	GR	TO
dic	1,00										
d	0,77	1,00									
d <sup>2</sup> h	0,75	0,97	1,00								
I	0,18	0,44	0,47	1,00							
hic	0,18	0,38	0,50	0,26	1,00						
Is	0,08	-0,17	-0,12	-0,22	0,07	1,00					
LF	0,78	0,94	0,97	0,45	0,48	-0,01	1,00				
CF	0,82	0,91	0,93	0,47	0,36	-0,05	0,92	1,00			
GA	0,86	0,82	0,82	0,30	0,27	0,26	0,88	0,85	1,00		
GR	0,66	0,72	0,70	0,43	0,36	0,03	0,74	0,74	0,70	1,00	
TO	0,84	0,93	0,95	0,43	0,41	0,06	0,98	0,95	0,94	0,79	1,00

Em que: dic = diâmetro no início da copa; d = diâmetro à altura do peito; h = altura total; I = idade; hic = altura de início da copa; Is = índice de saliência; LF = lenho do fuste; CF = casca do fuste; GA = galhos; GR = grimpas, TO = biomassa aérea total.

Destaca-se que a adição da variável diâmetro no início da copa no modelo (28) acarreta em uma melhora das estatísticas de avaliação do modelo para estimar a biomassa do componente casca do fuste ( $R^2_{adj} = 0,89$  e  $S_{yx} = 12,3\%$ ), bem como a adição das variáveis diâmetro no início da copa e idade resultam em uma melhora na predição da biomassa aérea total (Modelo 31), com  $R^2_{adj} = 0,96$  e  $S_{yx} = 7,9\%$ . Todavia, dada a dificuldade em se obter tais variáveis, optou-se por não incluí-las nas equações de biomassa dos respectivos componentes.

## 5 DISCUSSÃO

Para obter estimativa mais acurada da biomassa dos componentes da copa, Satoo e Madgwick (1982) sugeriram que, além do diâmetro e altura como variáveis independentes, outras variáveis poderiam ser adicionadas, como a altura e o diâmetro da copa e a área basal da árvore. Timoni et al. (1997) recomendaram a inclusão do diâmetro do tronco na inserção do primeiro galho da copa. Soares et al. (1996) constataram que a inclusão do diâmetro do tronco na inserção do primeiro galho como variável independente aumentou, significativamente, a precisão das estimativas das biomassas de galhos e de folhas em povoamentos de *Eucalyptus grandis*.

Baseando-se nos modelos *stepwise* observou-se uma melhor relação entre a variável biomassa e o produto entre o quadrado do diâmetro e a altura total ( $d^2h$ ), sendo essa relação selecionada para a predição da biomassa dos componentes lenho do fuste (correlação igual a 0,97), casca do fuste (0,93), galhos (0,82) e biomassa aérea total (0,95).

A variável índice de saliência (Is), embora tenha apresentado baixa correlação com a biomassa dos componentes lenho do fuste (-0,01), galhos (0,26) e biomassa aérea total (0,06), foi selecionada na predição da biomassa dos referidos componentes pelo procedimento *stepwise*. O mesmo fato foi observado por Machado et al. (2014). Em relação a isso, Loures et al. (2001) afirmaram que as variáveis podem apresentar quatro possíveis relações: (i) uma determinada variável independente (x) apresenta alto efeito direto e está correlacionada significativamente com a variável dependente (y), indicando ser determinante da variação em y; (ii) a variável independente apresenta efeito direto elevado mas pouca correlação com (y), indicando que, em uma análise conjunta com as demais variáveis independentes, pode resultar em grandes benefícios para efeito de estimativas, mas não deve ser utilizada isoladamente; (iii) a variável (x) apresenta correlação elevada com (y), mas efeito direto reduzido, indicando que seus efeitos ocorrem, principalmente, indiretamente por meio de outras variáveis do modelo e seu uso é de pouca utilidade nas determinações dos efeitos das variáveis independentes sobre (y); (iv) a variável independente apresenta baixos valores, tanto do efeito direto, como para correlação com (y), indicando ser de pouca utilidade para as estimativas. O

mesmo foi observado para a variável altura de início da copa e a biomassa dos galhos (0,27).

Para verificar os efeitos das variáveis independentes selecionadas sobre a variável resposta (biomassa), realizou-se a análise de coeficiente de trilha de acordo com Cruz et al. (2012). Destaca-se que esta análise foi realizada para os componentes lenho do fuste (TABELA 13), galhos (TABELA 14) e biomassa aérea total (TABELA 15), visto que os componentes casca do fuste e grimpas foram estimados pelo efeito direto das variáveis  $d^2h$  e  $d$ , respectivamente.

TABELA 13 – EFEITOS DIRETOS (DIAGONAL, EM NEGRITO) E INDIRETOS, CORRELAÇÃO ( $r$ ) E RAZÃO ENTRE OS EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A BIOMASSA DO LENHO DO FUSTE.

VARIÁVEL	Efeitos diretos e indiretos		$\Sigma$ Indiretos	$r$	Diretos/Indiretos
	$d^2h$	Is			
$d^2h$	<b>0,983</b>	-0,013	-0,013	0,970	-75,9
Is	-0,118	<b>0,108</b>	-0,118	-0,010	-0,9

Em que:  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $h$  = altura total (m); Is = índice de saliência.

TABELA 14 – EFEITOS DIRETOS (DIAGONAL, EM NEGRITO) E INDIRETOS, CORRELAÇÃO ( $r$ ) E RAZÃO ENTRE OS EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A BIOMASSA DOS GALHOS.

VARIÁVEL	Efeitos diretos e indiretos			$\Sigma$ Indiretos	$r$	Diretos/Indiretos
	$d^2h$	Is	hic			
$d^2h$	<b>0,995</b>	-0,048	-0,128	-0,175	0,820	-5,7
Is	-0,119	<b>0,397</b>	-0,018	-0,137	0,260	-2,9
hic	0,498	0,028	<b>-0,256</b>	0,526	0,270	-0,5

Em que:  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $h$  = altura total (m); Is = índice de saliência; hic = altura de início da copa (m).

TABELA 15 – EFEITOS DIRETOS (DIAGONAL, EM NEGRITO) E INDIRETOS, CORRELAÇÃO ( $r$ ) E RAZÃO ENTRE OS EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A BIOMASSA AÉREA TOTAL.

VARIÁVEL	Efeitos diretos e indiretos		$\Sigma$ Indiretos	$r$	Diretos/Indiretos
	$d^2h$	Is			
$d^2h$	<b>0,971</b>	-0,021	-0,021	0,970	-45,8
Is	-0,117	<b>0,177</b>	-0,117	0,060	-1,5

Em que:  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $h$  = altura total (m); Is = índice de saliência.

A variável  $d^2h$  apresentou forte correlação positiva com os componentes lenho do fuste, galhos e biomassa aérea total, sendo seu efeito direto, respectivamente, 75,9; 5,7 e 45,8 vezes maior que os efeitos indiretos para os referidos componentes.



A variável (Is) apresentou baixa correlação com os componentes avaliados, em virtude dos efeitos indiretos negativos com as variáveis ( $d^2h$ ) e (hic). Isso significa que o aumento proporcional da copa em relação ao diâmetro resulta em um decréscimo das variáveis diâmetro, altura e altura de início da copa e consequentemente na produção de biomassa do lenho do fuste e biomassa aérea total. Os resultados obtidos por Silva et al. (2017) corroboram o encontrado neste estudo, visto que os autores observaram uma redução do índice de saliência à medida que o diâmetro aumentou. Klein et al. (2017) encontraram correlação negativa entre o índice de saliência e as variáveis DAP (-0,23) e h (-0,32). Por outro lado, o aumento do índice de saliência acarreta em uma maior área de copa e consequentemente uma maior produção de biomassa dos galhos, fato verificado pelo maior efeito direto da variável índice de saliência e o componente galhos (0,40).

A variável altura de início da copa, apesar da baixa correlação com o componente galhos, apresentou elevado efeito indireto, indicando que tal variável não deve ser usada isoladamente para estimar a biomassa dos galhos, mas têm papel importante quando associada às variáveis ( $d^2h$ ) e (Is).

As equações ajustadas para estimar a biomassa do lenho e casca do fuste apresentaram as melhores capacidades preditivas em comparação aos componentes da copa (galhos e grimpas). A biomassa dos componentes da copa é naturalmente mais variável em comparação com os outros componentes da biomassa, uma vez que sofrem maiores influências de fatores internos e externos, como destacado por Satoo e Madgwick (1982) e António et al. (2007). O mesmo foi observado nos trabalhos de Valério et al. (2007), Balbinot et al. (2009), Barbeiro et al. (2009), Giongo et al. (2011), Sanquetta et al. (2014), Sanquetta et al. (2015) e Coutinho et al. (2017). As variações resultantes da relação entre a biomassa de cada componente, o volume, a idade e os fatores que afetam o crescimento das árvores em ambientes naturais, foi abordada e amplamente discutida no capítulo 1, item 5.

Em relação aos modelos tradicionais ajustados independentemente, observou-se que, em todos os casos, as estatísticas de avaliação foram superiores àquelas obtidas pelo ajuste simultâneo, porém com valores bastante próximos. Considerando os modelos *stepwise*, observou-se uma menor variação dessas estatísticas, sendo que, em alguns casos, o ajustamento



simultâneo apresentou desempenho superior ao ajuste independente. Sanquetta et al. (2015) comparando as estimativas de biomassa de *Pinus elliottii* obtidas pelo ajuste simultâneo (NSUR) com as estimativas obtidas com ajuste independente (EGNLS) concluiu que o procedimento NSUR não levou a variações apreciáveis nas estatísticas dos ajustes, com exceção dos intervalos de confiança e predição, onde o ajuste NSUR foi mais eficiente.

De acordo com Cunia e Briggs (1984) e Parresol (1999) outra vantagem da modelagem simultânea é que o cálculo da biomassa total é fornecido por três fatores: uso das mesmas variáveis independentes para a estimativa de cada componente da biomassa, utilização das melhores funções de regressão de cada componente e, finalmente, garantia de que a estimativa da biomassa total se dê em função das regressões de cada componente, garantindo a aditividade das estimativas.

Embora, no Brasil os trabalhos abordando a modelagem simultânea se restrinjam aos estudos conduzidos por Sanquetta et al. (2014), Sanquetta et al. (2015) e Coutinho et al. (2017), vários pesquisadores têm abordado esse tema (PARRESOL 1999, 2001; BI et al., 2001; NÁVAR et al., 2002; CARVALHO; PARRESOL, 2003; BI et al., 2004; NÁVAR et al., 2004; LAMBERT et al., 2005; ANTÓNIO et al., 2007; CORREIA et al., 2008; NÁVAR, 2009; BI et al., 2010; GOICOA et al., 2011; RUIZ-PEINALDO et al., 2012; CANGA et al., 2013; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ et al., 2013; VIANA et al., 2013; POUDEL; TEMESGEN 2016; ZHAO et al., 2016; KRALICEK et al., 2017).

A modelagem simultânea apresenta ainda as seguintes vantagens: estimativas de biomassa mais consistentes para o total e para os componentes e coeficientes mais consistentes e com menores intervalos de confiança e predição (CUNIA; BRIGGS, 1984; PARRESOL, 1999; CARVALHO; PARRESOL, 2003). Segundo Sanquetta et al. (2015) os efeitos positivos das diminuições nos intervalos de confiança e de predição estão associados à variações menores obtidas pela aplicação do método de estimação simultânea, considerando a correlação contemporânea entre os componentes, sendo que quanto menores forem os intervalos de confiança para as equações, melhores serão os intervalos de predição, gerando estimadores mais eficientes.

Observa-se que os sistemas de equações dos modelos tradicionais e *stepwise* para a estimativa da biomassa total apresentaram critério de

informação de Akaike e Bayesiano bastante superiores àqueles obtidos pelo ajuste independente. Isso é devido à equação de biomassa total correspondente ao sistema de equação ser composta pelo somatório das funções de todos os componentes, nesse caso o número de parâmetros da equação de biomassa total resultante do ajuste simultâneo é superior ao número de parâmetros da equação de biomassa total resultante do ajuste independente. Nesse sentido, Burnham e Anderson (2004) afirmaram que tais critérios se baseiam na teoria da informação, considerando que quanto menor o valor dos respectivos critérios, mais a equação explica a relação entre as variáveis, levando em consideração a qualidade da informação, bem como a qualidade da ligação entre as variáveis e o número de preditores que compõem o modelo, penalizando aqueles com número maior de parâmetros.

## 6 CONCLUSÕES

- A modelagem da biomassa total e dos respectivos componentes não deve ser tratada separadamente, como é o caso do ajuste independente, devido às estimativas não serem aditivas, ou seja, o somatório da biomassa de cada componente não corresponde à biomassa total;
- A abordagem simultânea é mais adequada que a abordagem independente para a estimativa da biomassa total e dos respectivos componentes, visto que leva em consideração a interdependência dos componentes, incluindo uma série de relações alométricas;
- A abordagem simultânea não resultou em expressivas mudanças nas estatísticas de ajuste das equações quando comparada à abordagem independente, todavia tem como vantagem a garantia da aditividade, menores intervalos de confiança dos coeficientes e, conseqüentemente, estimadores mais eficientes;
- Os modelos tradicionais e *stepwise* apresentaram estatísticas de ajustes satisfatórias aos dados do estudo, sendo que as equações ajustadas para estimar a biomassa do lenho e casca do fuste apresentaram as melhores capacidades preditivas em comparação aos componentes da copa, dada a maior variabilidade dos galhos e grimpas;
- Os modelos *stepwise* melhoraram as estatísticas de ajuste para os componentes lenho e casca do fuste, galhos e biomassa aérea total, sendo as variáveis ( $d^2h$ ) e índice de saliência selecionadas para estimar a biomassa dos referidos componentes, além da variável altura de início da copa importante na predição da biomassa dos galhos.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, K.; NIZAMI, S. Assessing biomass expansion factor of birch tree *Betula utilis* D. DON. **Open Journal of Forestry**, n. 4, p. 181-190, 2014.
- ANTÓNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.; SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n.5, p. 895-906, 2007.
- ASTARITA, L. V.; FLOH, E. I. S.; HANDRO, W. Free amino acid, protein and water content changes associated with seed development in *Araucaria angustifolia*. **Biologia Plantarum**, v. 47, n. 1, p. 53-59, 2003.
- BALBINOT, R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; MARCENE, E. A. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 232-237, 2009.
- BARBEIRO, L. S. S.; VIEIRA, G.; SANQUETTA, C. R. Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness (Canela-amarela). **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 833-843, 2009.
- BI, H.; BIRK, E.; TURNER, J.; LAMBERT, M.; JURSKIS, V. Converting stem volume to biomass with additivity, bias correction, and confidence bands for two Australian tree species. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.31, n.3, p. 298-319, 2001.
- BI, H.; LONG, Y.; TURNER, J.; LEI, Y.; SNOWDON, P.; LI, Y.; HARPER, R.; ZERIHUN, A.; XIMENES, F. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 2301-2314, 2010.
- BI, H.; TURNER, J.; LAMBERT, M. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. **Trees**, v. 18, p. 467-479, 2004.
- BRASIL. Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014. Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria\\_mma\\_443\\_2014.pdf](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria_mma_443_2014.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2017.
- BROWN, S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. **FAO Forestry Paper** 134, FAO, United Nations, Rome. 1997. 58p.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological Methods and Research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, 2004.

CANGA, E.; DIEGUEZ-ARANDA, I.; AFIF-KHOURI, E.; CAMARA-OBREGON, A. Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. **Forest Systems**, v. 22, n. 3, p. 408-415, 2013.

CARVALHO, J. P.; PARRESOL, B. R. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 269-276, 2003.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIFDUMAYO, E.; COLGAN, M. S.; DELITTI, W. B. C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P. M.; GOODMAN, R. C.; HENRY, M.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W. A.; MULLER-LANDAU, H.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B. W.; NGOMANDA, A.; NOGUERIA, E. M.; ORTIZMALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLONTON, P.; RYAN, C. M.; SALDARRIAGA, J. G.; VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3177-3190, 2014.

CHIYENDA, S. S.; KOZAK, A. Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, p. 441-446, 1984.

CORREIA, A.; FAIAS, S.; TOMÉ, M.; EVANGELISTA, M.; FREIRE, J.; CARVALHO, P. O. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de Pinheiro Manso no Sul de Portugal. **Silva Lusitana**, Oeiras, v.16, n.2, p.197-205, 2008.

COUTINHO, V. M.; SANQUETTA, C. R.; SANQUETTA, M. N. I.; RODRIGUES, A. L.; CORTE, A. P. D. Equações tradicionais e simultâneas para biomassa de compartimentos aéreos de *Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v.35, n.1, p.58-75, 2017.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético**. Viçosa: Editora UFV, 4 ed., 2012. 514p.

CUNIA, T. On tree biomass tables and regression: some statistical comments. In: FRAYERN, W. E. (ed). Forest resource inventories. **Workshop proceedings**. 2. Colorado, Colorado State University, 1979. p. 629-642.

CUNIA, T.; BRIGGS, R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, p. 376-384, 1984.

DAWKINS, H. C. **The management of natural tropical high forest with special reference to Uganda**. Oxford: University of Oxford, Imperial Forestry Institute; 1958.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, n. 263, p. 185-190, 1994.

FANG, J.; CHEN, A.; PENG, C.; ZHAO, S.; CI, L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. **Science**, v. 292, p. 2320-2322, 2001.

GALLANT, A. R. **Nonlinear statistical models**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 3, p. 81-86, 2011.

GOICOA, T.; MILITINO, A. F.; UGARTE, M. D. Modelling aboveground tree biomass while achieving the additivity property. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 18, p. 367-384, 2011.

HERCOWITZ, M.; MATTOS, L.; SOUZA, R. P. Estudos de casos sobre serviços ambientais. In: MATTOS, L.; HERCOWITZ, M. (Ed.). **Economia do meio ambiente e serviços ambientais**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 163-279.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L. NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, n. 403, p. 301-304, 2000.

HOUGHTON, R. A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. **Global Change Biology**, v. 11, n. 6, p. 945-958, 2005.

IBGE. **Mapa de aplicação da Lei nº 11.428 de 2006 que dispõem sobre a utilização e proteção do Bioma Mata Atlântica e de outras providências**. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009.

JACOBS, M. W.; CUNIA, T. Use of dummy variables to harmonize tree biomass tables. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 10, p. 483-490, 1980.

KINDERMANN, E. G.; MCCALLUM, I.; FRITZ, S.; OBERSTEINER, M. A Global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. **Silva Fennica**, v. 42, n. 2, p. 387-396, 2008.

KLEIN, D. R.; HESS, A. F.; KREFTA, S. M.; FILHO, M. D. H. V.; CIARNOSCKI, D.; COSTA, E. A. Relações morfométricas para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 4, p. 501-512, 2017.

KOZAK, A. Methods of ensuring additivity of biomass components by regression analysis. **The Forestry Chronicle**, v. 46, n. 5, p. 402-404, 1970.

KRALICEK, K.; HUY, B.; POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H.; SALAS, C. Simultaneous estimation of above- and below-ground biomass in tropical

forests of Viet Nam. **Forest Ecology and Management**, v. 390, p. 147–156. 2017.

KURZ, W. A.; DYMOND, C. C.; STINSON, G.; RAMPLEY, G. J.; NEILSON, E. T.; CARROL, A. L.; EBATA, T.; SAFRANYIK, L. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. **Nature**, n. 452, p. 987-990, 2008.

LAMBERT, M. C.; UNG, C. H.; RAULIER, F. Canadian national tree aboveground biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 1996-2018, 2005.

LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, A. K.; BARBATI, A.; GARCIA GONZALO, J.; SEIDI, R.; DELZON, S. CORONA, P.; KOLSTRÖM, M.; LEXER, M. J.; MARCHETTI, M. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 698-709, 2010.

LOURES, B. T. R. R.; RIBEIRO, R. P.; VARGAS, L.; MOREIRA, H. L. M.; SUSSEL, F. R.; POVH, J. A.; CAVICHIOLO, F. Manejo alimentar de alevinos de tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus* (L.), associado às variáveis físicas, químicas e biológicas do ambiente. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 4, p. 877-883, 2001.

MACHADO, S. A.; ZAMIN, N. T.; NASCIMENTO, R. G. M.; SANTOS, A. A. P. Efeito de variáveis climáticas no crescimento mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em fase juvenil. **Floresta e Ambiente**, n. 21, v. 2, p. 170-181, 2014.

MANDAL, R. A.; YADAV, B. K. V.; YADAV, K. K.; DUTTA, I. C.; HAQUE, S. M. Development of allometric equation for biomass estimation of *Eucalyptus camaldulensis*: a study from Sagarnath Forest, Nepal. **International Journal of Biodiversity and Ecosystems**, n. 1, v. 1, p. 1-7, 2013.

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.; CANGA, E.; BARRIO-ANTA, M.; MAJADA, J.; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P. A three level system for estimating the biomass of *Castanea sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 291, p. 417-426, 2013.

MOTULSKY, H.; CHRISTOPOULOS, A. **Fitting models to biological data using linear e nonlinear regression: a pratical guide to curve fitting**. San Diego: GraphPad Software, 2003. 351p.

NÁVAR, J. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. **Annals of Forest Science**, v. 66, p. 1-21, 2009.

NÁVAR, J.; MÉNDEZ, E.; DALE, V. Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. **Annals of Forest Science**, v. 59, p. 813-821, 2002.



NÁVAR, J.; MÉNDEZ, E.; NÁJERA, A.; GRACIANO, J.; DALE, V.; PARRESOL, B. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 59, n. 4, p. 657-674, 2004.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 865-878, 2001.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, p. 573-593, 1999.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Colombo: Embrapa Florestas; Brasília: Embrapa, 2015. 370p.

POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H. Methods for estimating aboveground biomass and its components for Douglas-fir and lodgepole pine trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, p. 77-87, 2016.

REED, D. D.; GREEN, E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 15, p. 1184-1187, 1985.

RUIZ-PEINALDO, R. G.; MONTERO, G.; DEL RIO, M. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. **Forest Systems**, v. 21, p. 42-52, 2012.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; PÉLLICO NETTO, S.; SCHIKOWSKI, A. B.; AMARAL, M. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 8, p. 1099-1112, 2015.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 33-40. 2003.

SANTOS, R. F.; VIVAN, J. L. **Pagamento por serviços ecossistêmicos em perspectiva comparada: recomendações para tomada de decisão**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 180p. (Diálogos Setoriais União Europeia-Brasil).

SAS Institute Inc. SAS/STAT. User's Guide, Version 9.0. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2004.



SATOO, T.; MADGWICK, H. A. I. **Forest biomass**. The Hague: Martinus Nijhoff, 1982. 151p.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G.; VIERA, M. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 53-62, 2011.

SILVA, F. A.; FORTES, F. O.; RIVA, D.; SCHORR, L. P. B. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na Região Norte do Rio Grande do Sul. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.4, n.3, p.143-146, 2017.

SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; BOGNOLA, I. A. Recomendação de solos para *Araucaria angustifolia* com base nas suas propriedades físicas e químicas. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 43, p. 61-74, 2001.

SOARES, C. P. B. NETO, F. P.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G. Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, v. 20, n. 2, p. 179-189, 1996.

SRIVASTAVA, V. K.; GILES, D. E. A. **Seemingly Unrelated Regression Equations Models**. Estimation and Inference. New York: Marcel Decker, 1987. 374p.

TIMONI, J. L.; VEIGA, R. A. A.; PINHEIRO, G. S. Determinação de equações para quantificação da biomassa da copa de árvores de *Eucalyptus saligna* Smith aos 22 anos. **Revista do Instituto Florestal**, v. 9, n. 1, p. 61-69, 1997.

VALÉRIO, A. F.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, R. T.; SILVESTRE, R.; KOEHLER, H. S. Ajuste de modelos matemáticos para estimativa de biomassa nos distintos componentes de uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thunb.). **Ambiência**, v. 3, n. 3, p. 325-336, 2007.

VIANA, H.; MARQUES, C. P.; FONSECA, T. Predição da biomassa aérea da *Pinus pinaster* Aiton por um sistema de equações aditivas integrado no simulador open source modispinaster. **Silva Lusitana**. v. 21. p. 1-9, 2013.

YAMAGUCHI, L. F.; KATO, M. J. Diurnal and seasonal changes in biflavonoids biosynthesis in *Araucaria angustifolia* needles. **Global Journal of Biochemistry**, v. 3, n. 9, p. 1-7, 2012.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. **Journal of the American Statistical Association**, v. 57, n. 298, p. 348-368, 1962.

ZHAO, D.; KANE, M.; TESKEY, R.; MARKEWITZ, D. Modeling aboveground biomass components and volume-to-weight conversion ratios for loblolly pine trees. **Forest Science**, v. 62, p. 463-473, 2016.

## CAPÍTULO 3

### AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS EMPREGADAS NA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.)

Kuntze

#### RESUMO

O objetivo do trabalho foi comparar as estimativas de biomassa aérea total obtidas por sistemas de equações alométricas, fatores de expansão de biomassa (FEBs) e fatores de expansão e conversão (BCEFs) de biomassa. Os dados de biomassa aérea e dos respectivos componentes foram obtidos pelo método direto em 29 indivíduos nativos da espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, localizados em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana em Fernandes Pinheiro, Paraná. Calculou-se a biomassa aérea pela aplicação de três diferentes abordagens: (i) sistemas de equações alométricas tradicionais e obtidas pelo procedimento *stepwise*, ajustadas via regressão; (ii) fatores de expansão de biomassa, considerando diferentes abordagens para a obtenção da variável biomassa do fuste e (iii) fatores de expansão e conversão de biomassa, considerando diferentes abordagens para a obtenção da variável volume do fuste. As estatísticas empregadas para a avaliação das estimativas foram coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), porcentagem do erro quadrático médio (RMSE%), porcentagem de resíduos (RP) e análise gráfica dos resíduos. Embora o fator de expansão e conversão calculado com base nas biomassas aérea e do fuste mensuradas (valores reais) tenha sido a abordagem com melhor desempenho na estimativa da biomassa aérea, a variável biomassa do fuste é difícil de ser obtida. Nesse sentido, as abordagens que consideram os sistemas de equações alométricas apresentaram resultados interessantes, tanto do ponto de vista da precisão das estimativas quanto da sua aplicabilidade. O sistema de equações tradicionais apresentou estatísticas similares quando aplicado diretamente na estimativa da biomassa aérea total e, indiretamente, quando aplicado na estimativa da biomassa do fuste associado ao fator de expansão. O sistema de equações *stepwise* apresentou estatísticas similares ao sistema tradicional quando aplicado indiretamente, todavia sua aplicação direta apresentou estimativas mais precisas da biomassa aérea total. A abordagem considerando a variável volume cubado apresentou bons resultados, todavia, a mesma deve ser aplicada associando-a ao fator de expansão e conversão específico, sendo que o produto entre o volume do fuste e a densidade média da espécie não pode ser considerada como variável correspondente à biomassa do fuste. A abordagem correspondente à estimativa do volume do fuste não se configurou em um bom estimador da biomassa aérea total, apresentando o pior desempenho entre as abordagens avaliadas.

**Palavras-chave:** componentes da biomassa; equações alométricas; fator de expansão e conversão de biomassa; sistemas de equações.

## CHAPTER 3

### EVALUATION OF DIFFERENT METHODOLOGIES USED IN THE ABOVEGROUND BIOMASS ESTIMATE OF *Araucaria angustifolia* (Bertol.)

Kuntze

#### ABSTRACT

The aim of this work was to compare the aboveground biomass estimates obtained by allometric equation systems, biomass expansion factors (FEBs) and biomass expansion and conversion factors (BCEFs). The aboveground biomass data and its components were obtained by direct method in 29 native trees of the species *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, located in a fragment of the Mixed Ombrophylous Forest in Fernandes Pinheiro, Paraná. The aboveground biomass was estimated by three different approaches: (i) systems of traditional allometric and equations obtained by the stepwise procedure, fitting by regression; (ii) biomass expansion factors, considering different approaches to obtain the variable biomass of the stem and (iii) biomass expansion and conversion factors, considering different approaches to obtain the variable stem volume. The statistics used to evaluate the estimates were Pearson correlation coefficient ( $r$ ), mean absolute error (MAE), square root mean square error (RMSE), percentage of mean square error (RMSE%), percentage of residuals (RP) and graphical analysis of residuals. Although the FEB calculated on the basis of the measured biomass and aerial biomass (real values) was the approach with the best performance in the aboveground biomass estimation, the determination of the biomass variable of the stem is difficult to obtain. In this sense, the approaches that consider the systems of allometric equations presented interesting results, both from the point of view of the accuracy of the estimates and their applicability. The system of traditional equations presented similar statistics when applied directly to the estimation of the aboveground biomass and, indirectly, when applied in the estimation of the stem biomass associated to the expansion factor. The system of *stepwise* equations presented similar statistics than traditional system when applied indirectly, however its direct application presented more accurate estimates of aboveground biomass. The approach considering the variable scaled volume presented good results, however, it should be applied by associating it with the specific expansion and conversion factor, and the product between the stem volume and the mean density of the species should not be considered as a variable corresponding to the stem biomass. The approach corresponding to the estimate of the stem volume is not a good estimator of the aboveground biomass, presenting the worst performance among the evaluated approaches.

**Keywords:** allometric equations; biomass components; biomass expansion and conversion factor; system of equations.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da densidade demográfica e a diminuição dos recursos naturais, associados ao crescimento das diversas atividades antrópicas, têm promovido a intensificação e aumento das concentrações dos gases de efeito estufa (GEE) que, conseqüentemente, influenciam nas mudanças climáticas. O efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente, devido, principalmente, à emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e clorofluorcarbono (CFC). Entre eles, o  $\text{CO}_2$  é o gás que mais contribui para o aquecimento global, devido à grande quantidade que é emitida, cerca de 55% do total (CERRI et al., 2007).

O aumento da emissão de GEE e o conseqüente aquecimento global do planeta vêm acarretando a busca por alternativas que visem à redução das fontes desses gases. Nesse sentido, buscam-se cada vez mais estratégias para redução da concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico, dentre elas podem-se citar a redução das emissões por queima de combustíveis fósseis, a redução da queima de material vegetal e o sequestro de carbono pelo plantio florestal (CARVALHO et al., 2010).

As florestas promovem inúmeros benefícios diretos e indiretos ao ser humano e também contribuem, decisivamente, reduzindo os impactos ambientais decorrentes do efeito estufa, pela absorção e fixação de carbono em sua biomassa. O sequestro de carbono refere-se à forma natural dos organismos vegetais fixarem o  $\text{CO}_2$  em forma de matéria lenhosa. De acordo com Aduan et al. (2003) o carbono passa a fazer parte da biomassa vegetal pelo processo da fotossíntese, ou seja, na presença de luz, as plantas retiram o dióxido de carbono do ar, usam o carbono para crescer e liberam o oxigênio para a atmosfera. Em suma, a fotossíntese é caracterizada pelo processo em que as plantas, com a ação da luz solar, transformam energia luminosa em tecido vivo. Esse tecido é denominado biomassa ou matéria orgânica.

Biomassa pode ser definida como a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta (também denominada necromassa), animal ou vegetal. Na área florestal pode significar toda massa existente na floresta ou em algum compartimento que a compõe, sendo também utilizado o termo fitomassa para referir-se a biomassa de origem vegetal (BROWN, 1997; SANQUETTA, 2002).

A determinação da quantidade de carbono estocado em indivíduos arbóreos e, conseqüentemente, em florestas ou povoamentos florestais pode ser realizada pela quantificação da biomassa e posterior determinação da concentração de carbono (CALDEIRA et al., 2015).

Os estudos de biomassa e carbono nas florestas podem ser realizados por diferentes abordagens. Geralmente, as metodologias dividem-se em métodos diretos e métodos indiretos (SANQUETTA et al., 2004). As avaliações pelo método direto (ou determinação) implicam no corte das árvores, separação e pesagem de seus componentes e, eventual, determinação do teor de carbono. Por outro lado, no método indireto, mais empregado, as estimativas de biomassa e/ou carbono consistem em correlacioná-los com alguma variável de fácil obtenção (diâmetro a 1,30 m, altura total, área basal) e que não requeira a destruição do material vegetal.

As metodologias usadas para se obterem estimativas de biomassa em áreas florestais são baseadas, principalmente, em dados de inventário florestal, empregando-se fatores e equações de biomassa que transformam dados de diâmetro, altura ou volume em tais estimativas (SOMOGYI et al., 2006).

Um dos métodos utilizados para converter variáveis biométricas de fácil mensuração em valores de biomassa é baseado em modelos que refletem a relação alométrica entre a biomassa e essas variáveis (BARTELINK, 1996; LANDSBERG; WARING, 1997; REED; TOMÉ, 1998; MONSERUD; MARSHAL, 1999; BROWN, 2002; ANTÓNIO et al., 2007; VALÉRIO et al., 2007; BALBINOT et al., 2009; BARBEIRO et al., 2009; GIONGO et al., 2011; SANQUETTA et al., 2014; SANQUETTA et al., 2015; COUTINHO et al., 2017).

Outra abordagem relacionada à obtenção indireta da biomassa aérea total corresponde aos Fatores de Expansão de Biomassa (FEBs). Nesse caso, obtém-se o FEB a partir da relação entre a biomassa da parte aérea e a biomassa do fuste da árvore (LEVY et al., 2004; CORTE et al., 2012; LUO et al., 2013; MOGNON et al., 2013; GIRI et al., 2014; SANQUETTA et al., 2014). Quando são realizadas as estimativas de biomassa por meio do volume e densidade da madeira, em geral, necessita-se recorrer ao uso de Fatores de Expansão e Conversão de Biomassa (BCEFs) para gerar as estimativas de biomassa aérea total. Genericamente, os BCEFs são fatores que permitem converter valores de volume do fuste, em biomassa, seguida da expansão do

quantitativo em biomassa para outro(s) componente(s) das árvores. Os fatores são calculados pelo quociente entre a biomassa do componente em consideração (copa, aérea e total) e o volume do fuste da(s) árvore(s). Esse método, inicialmente divulgado por Johnson e Sharpe (1983), tem sido usado por diversos autores (BROWN, 2002; LEHTONEN et al., 2004; SOMOGYI et al., 2006; LEHTONEN et al., 2007; SILVEIRA, 2010; SANQUETTA, 2011; CASTEDO-DORADO et al., 2012; AHMAD et al., 2014; KHURSHID; SYED, 2014; MAGALHÃES; SEIFERT, 2015; MELO et al., 2015; MARZILIANO et al., 2017) para diferentes ecossistemas florestais.

Diante do exposto, o objetivo da presente pesquisa foi comparar as estimativas de biomassa aérea total de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze obtidas por três diferentes abordagens: equações alométricas, fatores de expansão de biomassa (FEBs) e fatores de expansão e conversão de biomassa (BCEFes).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar as estimativas de biomassa aérea total de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze obtidas por três diferentes abordagens: equações alométricas, fatores de expansão de biomassa (FEBs) e fatores de expansão e conversão de biomassa (BCEFs).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estimar a biomassa aérea total com sistemas de equações alométricas tradicionais e obtidas pelo procedimento *stepwise*;
- b) Calcular fatores de expansão de biomassa (FEBs) considerando diferentes abordagens para a obtenção da variável biomassa do fuste;
- c) Calcular fatores de expansão e conversão de biomassa (BCEFs) considerando diferentes abordagens para a obtenção da variável volume do fuste;
- d) Estimar a biomassa aérea total aplicando os diferentes fatores calculados;
- e) Avaliar a precisão das diferentes estimativas.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ORIGEM DOS DADOS, ÁREA DE ESTUDO E QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA

A quantificação da biomassa foi realizada com base no método direto em 29 indivíduos nativos da espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. A caracterização da área de estudo, bem como a metodologia utilizada para a quantificação da biomassa, está descrita no capítulo 1, item 4.

#### 3.2 EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS USADAS PARA ESTIMAR A BIOMASSA AÉREA TOTAL

Para estimar a biomassa aérea total foram utilizados dois sistemas de equações alométricas, sendo um com modelos tradicionais (têm como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura total e/ou uma variação destes) e outro com equações obtidas pelo procedimento *stepwise* (têm como variáveis independentes, além do diâmetro e altura, outras variáveis biométricas e morfométricas das árvores). Para o ajustamento simultâneo, seguiu-se o procedimento sugerido por Parresol (1999), que consiste no método dos mínimos quadrados generalizados designado por *Seemingly Unrelated Regressions* (SUR) para modelos lineares e *Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* (NSUR) para modelos não lineares (PARRESOL, 2001).

Os referidos procedimentos foram processados no software *Statistical Analysis System* (SAS), com a opção ITSUR do procedimento MODEL (SAS INSTITUTE INC., 2004).

##### 3.2.1 Sistema com equações tradicionais

A estimativa da biomassa aérea total pelas equações tradicionais foi obtida pelo somatório das estimativas das biomassas dos componentes: lenho do fuste (1), casca do fuste (2), galhos (3) e grimpas (4), de acordo com as equações apresentadas a seguir.



$$y_{\text{LENHO DO FUSTE}} = 0,0270 (d^2 h)^{0,9671} \quad (1)$$

$$y_{\text{CASCA DO FUSTE}} = 0,0160 d^{2,1073} h^{0,5830} \quad (2)$$

$$y_{\text{GALHOS}} = -253,0434 + 0,2387 d^2 \quad (3)$$

$$y_{\text{GRIMPAS}} = 13456,91 - 545,84d + 5,46 d^2 + 23,52 dh - 0,23 d^2 h - 583,99 h \quad (4)$$

$$y_{\text{TOTAL}} = \text{LENHO DO FUSTE} + \text{CASCA DO FUSTE} + \text{GALHOS} + \text{GRIMPAS} \quad (\text{A1})$$

Em que:  $y_i$  = biomassa individual ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $h$  = altura total (m); A1 = abordagem 1.

### 3.2.2 Sistema com equações *stepwise*

A estimativa da biomassa aérea total pelos modelos *stepwise* foi obtida pelo somatório das estimativas das biomassas dos componentes: lenho do fuste (5), casca do fuste (6), galhos (7) e grimpas (8), de acordo com as equações apresentadas a seguir.

$$y_{\text{LENHO DO FUSTE}} = -162,432 + 0,0181(d^2 h) + 9,5514 (ls) \quad (5)$$

$$y_{\text{CASCA DO FUSTE}} = 20,577 + 0,006 (d^2 h) \quad (6)$$

$$y_{\text{GALHOS}} = 59,678 + 0,011(d^2 h) + 19,517 (ls) - 36,702 (hic) \quad (7)$$

$$y_{\text{GRIMPAS}} = -194,988 + 6,198 (d) \quad (8)$$

$$y_{\text{TOTAL}} = \text{LENHO DO FUSTE} + \text{CASCA DO FUSTE} + \text{GALHOS} + \text{GRIMPAS} \quad (\text{A2})$$

Em que:  $y_i$  = biomassa individual ( $\text{kg.árvore}^{-1}$ );  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $h$  = altura total (m);  $hic$  = altura de início da copa (m);  $ls$  = índice de saliência; A2 = abordagem 2.

Informações mais detalhadas relacionadas ao ajustamento e desenvolvimento dos sistemas de equações mencionados são apresentadas no capítulo 2, item 3.2.

### 3.3 FATORES DE EXPANSÃO DE BIOMASSA (FEBs)

Os fatores de expansão de biomassa (FEBs) foram calculados pela razão entre a biomassa total e a biomassa do fuste, conforme Somogyi et al. (2006). Além da biomassa do fuste obtida em campo, avaliou-se também aquelas resultantes do emprego das equações tradicionais para a estimativa da biomassa da madeira e casca do fuste (1 e 2) e obtidas pelas equações *stepwise* para a estimativa dos referidos componentes (5 e 6).

$$FEB = \frac{PS_{AÉREO}}{PS_{FUSTE}} \quad (A3)$$

$$FEB = \frac{PS_{AÉREO}}{PS_{FUSTE(1e2)}} \quad (A4)$$

$$FEB = \frac{PS_{AÉREO}}{PS_{FUSTE(5e6)}} \quad (A5)$$

Em que:  $PS_{AÉREO}$  = biomassa aérea medida em campo (kg);  $PS_{FUSTE}$  = biomassa do fuste medida em campo (kg); FEB = fator de expansão de biomassa;  $PS_{FUSTE(1 e 2)}$  = estimativa da biomassa do lenho e casca do fuste pelas respectivas equações tradicionais (1 e 2);  $PS_{FUSTE(5 e 6)}$  = estimativa da biomassa do lenho e casca do fuste pelas respectivas equações *stepwise* (5 e 6);  $A_i$  = abordagem.

### 3.4 FATORES DE EXPANSÃO E CONVERSÃO DE BIOMASSA (BCEF<sub>s</sub>)

Os fatores de expansão e conversão de biomassa foram calculados com base na densidade básica da madeira e volume total, conforme Brown (1997) e Somogyi et al. (2006). Além do volume obtido pela cubagem relativa dos fustes (ver capítulo 1, item 4), avaliou-se também o volume estimado pelo modelo de Schumacher-Hall, cujos parâmetros ajustados e estatísticas de avaliação foram:

$$\hat{v} = -5,27935 + 0,11801(d) + 0,09332(h) \quad (9)$$

$$R^2_{adj} = 0,94; S_{yx} = 9,5\%$$

$$BCEF = \frac{PS_{AÉREO}}{v \cdot D} \quad (A6)$$

$$BCEF = \frac{PS_{AÉREO}}{\hat{v} \cdot D} \quad (A7)$$

Em que: d = diâmetro à altura do peito; h = altura total (m);  $PS_{AÉREO}$  = biomassa aérea medida em campo (kg); v = volume cubado ( $m^3$ );  $\hat{v}$  = volume estimado pela equação 9 ( $m^3$ ); D = densidade básica média da espécie ( $kg.m^{-3}$ );  $A_i$  = abordagem.

A densidade do fuste de cada árvore foi obtida pela razão entre a massa seca e o volume úmido (amostra de madeira imersa em água até a saturação) de quatro discos de madeira com casca retirados ao longo do fuste, sendo três discos retirados na base, meio e topo do fuste comercial e um disco retirado do fuste não comercial, contemplando um verticilo e um espaço entre verticilos. A densidade média da espécie ( $492,2 \text{ kg.m}^{-3}$ ) foi obtida pela média da densidade de cada árvore.

Para obter estimativas pelo método da razão aplicado à massa ou ao volume do fuste (FEBs ou BCEFs), como a melhor estimativa linear sem tendência, duas possibilidades devem ser consideradas: (1) A variância da estimativa da massa ou volume do fuste é proporcional à variável independente  $x_i$  e (2) A variância da estimativa da massa ou volume do fuste é proporcional ao quadrado da variável independente  $x_i$ , conforme apresentado por Cochran (1963).

$$b = \frac{\sum w_i y_i x_i}{\sum w_i x_i^2}$$

$$1) \quad w_i = \frac{1}{\sigma_{e_i}^2} = \frac{1}{\lambda x_i}$$

$$b = \frac{\sum y_i}{\sum x_i} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = R_1$$

$$2) \quad w_i = \frac{1}{\sigma_{e_i}^2} = \frac{1}{\lambda x_i^2} \qquad b = \frac{\sum y_i}{\sum x_i} = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{y_i}{x_i} \right) = R_2$$

A opção 2 não é considerada a mais provável para expressar a proporção de massas ou volumes dos fustes, visto que os resultados experimentais relatados na literatura para esta condição ocorreram quando a variável  $x_i$  apresentou crescimento fixo (JESSEN et al., 1947), e este não é o caso neste estudo, conforme pode ser observado no capítulo 1, item 5.

### 3.5 AVALIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA AÉREA TOTAL

As estatísticas empregadas para a avaliação das estimativas de biomassa aérea total foram: coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), porcentagem do erro quadrático médio (RMSE%), porcentagem de resíduos (RP) e análise gráfica dos resíduos.

#### a) Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ):

Segundo Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) é uma medida de associação bivariada do grau de relacionamento entre duas variáveis. Em termos estatísticos, duas variáveis se associam quando elas guardam semelhanças na distribuição dos seus escores. Mais precisamente, elas podem se associar a partir da distribuição das frequências ou pelo compartilhamento de variância. No caso da correlação de Pearson ( $r$ ) vale esse último parâmetro, ou seja, ele é uma medida da variância compartilhada entre duas variáveis. O coeficiente varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis (KOZAK, 2009). O coeficiente de correlação de Pearson é definido por:

$$r = \frac{\text{Cov}(y, \hat{y})}{\sqrt{s^2(y) \cdot s^2(\hat{y})}} \quad (10)$$

b) Erro médio absoluto (MAE):

De acordo com Hallak e Pereira Filho (2011) a medida mais simples derivada da diferença entre os valores observados e estimados é o Erro Médio (ME em Inglês) ou tendência ou, ainda, viés (*BIAS* em Inglês). O viés mede a tendência do modelo superestimar ou subestimar a variável em relação ao observado. Esta tendência, também chamada de erro sistemático, é definida por:

$$\text{ME} = \text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y}) \quad (11)$$

Ainda, segundo os autores mencionados, em termos estatísticos, a média dos erros individuais ou viés é o primeiro momento da distribuição das diferenças. O viés não traz informação a respeito dos erros individuais e, portanto, não pode ser usado como medida de acurácia da simulação. Além disso, apesar de fornecer uma ideia da tendência ou erro sistemático, o viés é afetado pelo fato de que erros individuais positivos e negativos de mesma magnitude se cancelam na somatória, o que geralmente leva à subestimação do erro das simulações. A média dos erros absolutos (Erro Médio Absoluto ou MAE na sigla em Inglês) contorna este problema. Por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos, também chamados “pontos singulares” (ou “*outliers*” em Inglês), o MAE é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981). O MAE é definido por:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y - \hat{y}|}{n} \quad (12)$$

c) Raiz do erro quadrático médio (RMSE):

Uma medida frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos é o Erro Quadrático Médio (MSE na sigla em Inglês) como descrito, por exemplo, em Wilks (2006). O MSE é similar ao MAE, porém mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado. MSE é sempre positivo. MSE = 0 indica simulação perfeita. MSE é definido por:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \quad (13)$$

Em adição ao MSE, a raiz quadrada de MSE, ou Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em Inglês), é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. O RMSE é definido por:

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

d) Porcentagem do erro quadrático médio (RMSE%):

O RSME% corresponde ao percentual relativo à raiz do erro quadrático médio, sendo definido por:

$$\text{RMSE}(\%) = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (15)$$

e) Porcentagem dos resíduos (RP):

A porcentagem dos resíduos corresponde à relação entre o somatório dos resíduos relativos e o número de observações, sendo definido por:

$$\text{RP} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y - \hat{y}|}{y}}{n} \cdot 100 \quad (16)$$

Em que:  $Cov$  = covariância;  $s^2$  = variância;  $y$  = valores observados;  $\hat{y}$  = valores estimados;  $\bar{y}$  = média dos valores observados;  $n$  = número de observações.

A interpretação dos resultados das estatísticas MAE, RMSE, RMSE (%) e RP é feita com base nos menores valores correspondentes as referidas estatísticas, sendo que valores iguais a zero significam estimativa perfeita, ou seja, o valor estimado é igual ao valor real.

## 4 RESULTADOS

Na TABELA 16 e FIGURA 6 são apresentadas, respectivamente, as estatísticas de avaliação e as distribuições de resíduos referentes às diferentes abordagens empregadas para estimar a biomassa aérea total. Na TABELA 17 é apresentado o ranqueamento baseado nas estatísticas das diferentes abordagens, bem como um resumo das variáveis empregadas em cada uma delas.

TABELA 16 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS DIFERENTES ABORDAGENS EMPREGADAS PARA ESTIMAR A BIOMASSA AÉREA TOTAL DE *Araucaria angustifolia*.

Estatísticas	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
r	0,95	0,97	0,99	0,95	0,96	0,98	0,94
MAE (kg <sup>2</sup> )	201,12	168,31	117,14	208,39	196,16	127,72	216,80
RMSE (kg)	255,45	203,50	141,69	257,27	242,30	155,77	276,95
RMSE (%)	12,01	9,57	6,66	12,10	11,39	7,32	13,02
RP (%)	10,80	8,43	6,28	10,99	10,11	6,57	11,46
Fatores			1,3372	1,3494	1,3405	1,4678	1,4678
IC			[1,30 - 1,37]	[1,29 - 1,41]	[1,28 - 1,40]	[1,43 - 1,51]	[1,39 - 1,54]

r = coeficiente de correlação de Pearson; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; RMSE (%) = porcentagem do erro quadrático médio; RP = porcentagem de resíduos; IC = intervalo de confiança; A<sub>i</sub> = diferentes abordagens para a estimativa da biomassa aérea, onde: A1 = sistema de equações tradicionais; A2 = sistema de equações *stepwise*; A3 = FEB considerando a biomassa do fuste obtida em campo; A4 = FEB considerando a biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações tradicionais (1 e 2); A5 = FEB considerando a biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações *stepwise* (5 e 6); A6 = BCEF considerando o produto entre o volume do fuste cubado e a densidade média da espécie; A7 = BCEF considerando o produto entre o volume do fuste estimado e a densidade média da espécie.

TABELA 17 – RANQUEAMENTO DAS ABORDAGENS AVALIADAS PARA ESTIMAR A BIOMASSA AÉREA TOTAL.

Abordagem	Variáveis medidas		Variáveis estimadas	Qualidade do Ajuste
	Y	X		
A3	PS <sub>Total</sub>	PS <sub>Fuste</sub>		1°
A6	PS <sub>Total</sub>	v <sub>c/c</sub> , D <sub>sp</sub>		2°
A2	PS <sub>Total</sub>	d, h, dc, hic		3°
A5	PS <sub>Total</sub>	d, h, dc	PS <sub>Fuste</sub>	4°
A1	PS <sub>Total</sub>	d, h		5°
A4	PS <sub>Total</sub>	d, h	PS <sub>Fuste</sub>	6°
A7	PS <sub>Total</sub>	d, h, D <sub>sp</sub>	volume	7°

PS = peso seco (kg); v<sub>c/c</sub> = volume com casca cubado (m<sup>3</sup>); D<sub>sp</sub> = densidade básica da espécie (kg.m<sup>-3</sup>); d = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m), dc = diâmetro de copa (m); hic = altura de início da copa (m).



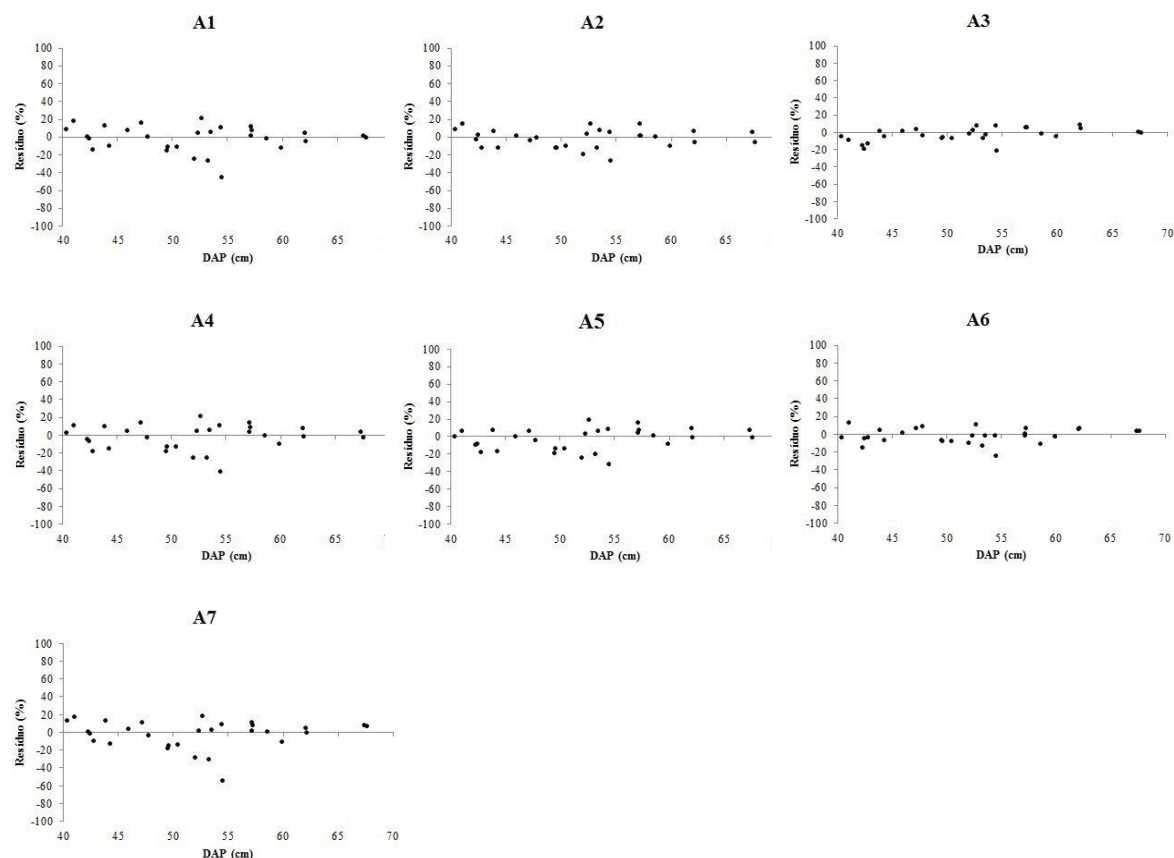


FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS DIFERENTES ABORDAGENS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA DE *Araucaria angustifolia*.

Observa-se que as melhores estatísticas de avaliação correspondem à estimativa da biomassa aérea obtida pela aplicação do FEB considerando a biomassa do fuste obtida em campo (A3). A segunda abordagem que apresentou as melhores estatísticas foi aquela na qual a biomassa aérea foi estimada pelo BCEF obtido pelo volume do fuste cubado e a densidade média da espécie (A6). As abordagens considerando os sistemas de equações *stepwise* para estimar a biomassa aérea total (A2) e a biomassa do fuste (A5) ocuparam, respectivamente, o 3° e 4° lugares em relação às estatísticas de avaliação. Em 5° e 6° lugares ficaram, respectivamente, as abordagens que consideram os sistemas de equações tradicionais para estimar a biomassa aérea total (A1) e a biomassa do fuste (A4) e, finalmente, as estatísticas menos expressivas correspondem à estimativa da biomassa aérea obtida pela aplicação do BCEF considerando o volume do fuste estimado e a densidade média da espécie.

Com base nas distribuições de resíduos das diferentes abordagens avaliadas, não foram observadas tendências de sub ou superestimativas.

Uma das maneiras de utilizar os fatores de expansão é lançando mão de valores *default*, que correspondem a valores genéricos ou médios, como aqueles apresentados nos trabalhos de Kauppi et al. (1992), Lowe et al. (2000), UN-ECE/FAO (2000), FAO (2001) e IPCC (2003, 2006). Nesse caso, tais valores são utilizados juntamente às variáveis biomassa ou volume e densidade do fuste (mensuradas ou estimadas) para a estimativa da biomassa total.

Nesse sentido, e considerando que a abordagem 3 apresentou as melhores estatísticas de avaliação e que o fator de expansão resultante da referida abordagem é obtido pela razão entre a biomassa aérea e a biomassa do fuste mensuradas (valores reais), comparou-se as estimativas de biomassa aérea considerando o fator resultante da abordagem 3 ( $FEB = 1,3372$ ) associado às diferentes variáveis  $x_i$ , ou seja, biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações tradicionais (A8); biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações *stepwise* (A9); produto entre o volume do fuste cubado e a densidade média da espécie (A10); produto entre o volume do fuste estimado e a densidade média da espécie (A11). As estatísticas de avaliação e respectivos gráficos de dispersão de resíduos são apresentados na TABELA 18 e FIGURA 7, respectivamente.

TABELA 18 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO REFERENTES ÀS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA AÉREA CONSIDERANDO ( $FEB = 1,3372$ ) E DIFERENTES ABORDAGENS DAS VARIÁVEIS BIOMASSA E VOLUME DO FUSTE.

Estatísticas	A8	A9	A10	A11
r	0,95	0,96	0,98	0,94
MAE (kg <sup>2</sup> )	209,35	196,57	208,61	289,71
RMSE (kg)	258,69	242,86	264,88	347,70
RMSE (%)	12,16	11,42	12,46	16,35
RP (%)	10,92	10,10	9,21	13,54

r = coeficiente de correlação de Pearson; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; RMSE (%) = porcentagem do erro quadrático médio; RP = porcentagem de resíduos;  $A_i$  = diferentes abordagens para estimativa da biomassa aérea, sendo: A8 = considerando a biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações tradicionais (1 e 2); A9 = considerando a biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações *stepwise* (5 e 6); A10 = considerando o produto entre o volume do fuste cubado e a densidade média da espécie; A11 = considerando o produto entre o volume do fuste estimado e a densidade média da espécie.

Observa-se que as abordagens 8 e 9 apresentaram estatísticas de avaliação com valores próximos e com distribuição homogênea dos resíduos (sem tendência), indicando que a biomassa aérea pode ser estimada com base no FEB resultante da abordagem 3 juntamente à biomassa do fuste estimada pelos sistemas de equações (tradicionais e *stepwise*). Embora a abordagem 10 tenha apresentado estatísticas similares às abordagens 8 e 9, observa-se uma tendência de subestimativa quando aplicadas as variáveis volume e densidade juntamente ao FEB obtido com base nos valores mensurados de biomassa aérea e biomassa do fuste. A mesma tendência foi observada na abordagem 11, cujas estatísticas de avaliação foram menos expressivas.

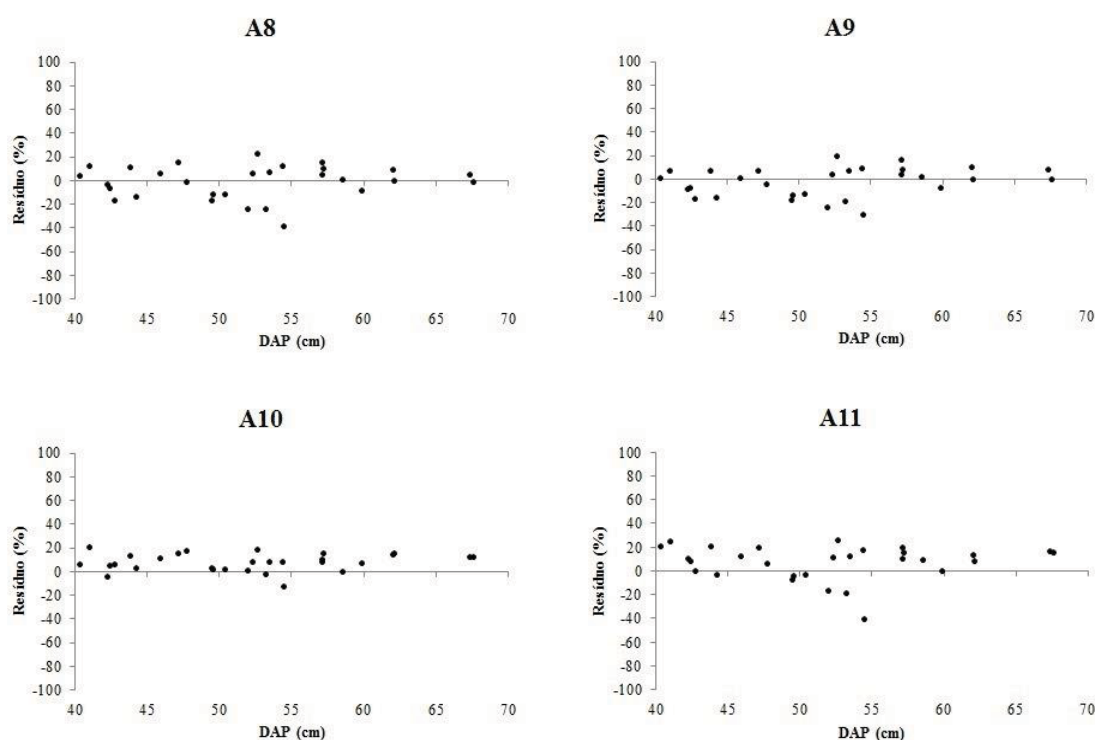


FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS REFERENTES ÀS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA AÉREA CONSIDERANDO (BEF = 1,3372) E DIFERENTES ABORDAGENS DAS VARIÁVEIS BIOMASSA E VOLUME DO FUSTE.

Em resumo, pode-se dizer que o FEB calculado com base na biomassa total e biomassa do fuste mensuradas, pode ser aplicado para estimar com precisão a biomassa aérea total juntamente às seguintes variáveis: biomassa do fuste mensurada, biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações tradicionais e biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações *stepwise*. Tal fato é comprovado pelos FEBs referentes às abordagens 3, 4 e 5 estarem

no mesmo intervalo de confiança (TABELA 16). A variável volume (cubado ou estimado) não deve ser usada juntamente ao FEB obtido pela razão entre as biomassas aérea e do fuste mensuradas, visto que apresentaram diferentes intervalos de confiança e uma consequente tendência em subestimar a biomassa aérea total. Caso as variáveis volume e densidade sejam usadas para estimar a biomassa aérea total, devem ser associadas ao fator de expansão e conversão específico (neste caso, BCEF = 1,4678).

Na TABELA 19 são apresentadas as estatísticas de avaliação referentes à relação entre a biomassa do fuste mensurada e as estimativas correspondentes. Observa-se uma melhor relação entre a biomassa do fuste (1) e as estimativas obtidas pelos sistemas de equações *stepwise* (3) e tradicionais (2) em comparação as variáveis volume do fuste cubado (4) e estimado (5).

TABELA 19 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO CORRESPONDENTES À VARIÁVEL BIOMASSA DO FUSTE E ESTIMATIVAS CORRESPONDENTES.

Estatística	1-2	1-3	1-4	1-5
r	0,97	0,98	0,99	0,96
MAE (kg <sup>2</sup> )	107,4	92,1	142,1	179,1
RMSE (kg)	129,7	117,8	169,8	212,1
RMSE (%)	8,2	7,4	10,7	13,3
RP (%)	7,6	6,3	9,4	11,9

r = coeficiente de correlação de Pearson; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; RMSE (%) = porcentagem do erro quadrático médio; RP = porcentagem de resíduos; 1 = biomassa do fuste mensurada; 2 = biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações tradicionais; 3 = biomassa do fuste estimada pelo sistema de equações *stepwise*; 4 = produto entre o volume cubado e a densidade da espécie; 5 = produto entre o volume estimado e a densidade da espécie.

## 5 DISCUSSÃO

As estimativas de estoque de biomassa e carbono de uma floresta com base em dados de inventário florestal podem ser realizadas pela aplicação de equações alométricas ou usando fatores de expansão e/ou conversão de biomassa (MONTAGU et al., 2005; TEOBALDELLI et al., 2009; KIM et al., 2011). Petersson et al. (2012) e Marziliano et al. (2017) afirmaram que as estimativas do estoque de biomassa e carbono e suas mudanças foram mais precisas com o emprego de equações alométricas em comparação aos fatores de expansão e/ou conversão sendo, o erro relacionado à escolha do modelo alométrico para estimar a variável de interesse de extrema importância (CHAVE et al., 2005; PELLETIER et al. 2010).

A precisão relativa de um determinado método depende dos dados utilizados para desenvolver os modelos alométricos ou da proporção de volume para biomassa. Segundo Pelletier et al. (2010), devido a alometria das árvores ser afetada por diversos fatores, a precisão das estimativas de biomassa depende estritamente das árvores amostradas utilizadas para a construção das relações de regressão. Ainda, de acordo com os autores citados, as estimativas são geradas com maior incerteza quando as características dendrométricas das árvores sob estimativa diferem das características das árvores amostradas utilizadas para a calibração dos modelos.

Os BCEFs dependem da estimativa do volume do fuste, seguido pela aplicação de fatores de expansão para representar os componentes das árvores, levando a um aumento de fontes de erro ao passar de um cálculo para outro (BROWN, 1997; NOGUEIRA et al., 2008; MARZILIANO et al., 2017). De acordo com Petersson et al. (2012) ao estimar as mudanças na biomassa viva, geralmente é difícil obter um valor confiável para toda a biomassa da árvore a partir do volume do fuste porque a proporção do fuste aumenta com o tamanho da árvore em relação aos outros componentes. Assim, o uso de fatores de biomassa (FEBs e BCEFs) pode levar a estimativas tendenciosas porque tais fatores variam com o tamanho da árvore e também as proporções dos componentes mudam ao longo do tempo (SATOO; MADGWICK, 1982; PAJTÍK et al., 2011, CORTE et al., 2012). Ahmad et al. (2014) corroboram afirmando que para avaliar o estoque de biomassa e carbono e suas mudanças ao longo

do tempo, em geral, é usado um fator (FEB ou BCEF) constante da floresta, porém esse valor constante não é aplicável porque tais fatores variam com o estado da floresta, a idade, sítio e outros fatores bióticos e abióticos (LEHTONEN et al., 2004; MONTAGU et al., 2005, TEOBALDELLI et al. 2009; KIM et al., 2011).

As informações relacionadas aos estoques de biomassa e carbono podem ser alcançadas, entre outros, através de métodos destrutivos, pelo corte de árvores para determinação da biomassa total e de seus componentes (fuste, casca, galhos, folhas) e, em seguida, pela construção de regressões para tais estimativas (SANESI et al., 2013). De acordo com Marziliano et al., (2017) poucas equações alométricas estão disponíveis em todo o mundo, sendo as existentes, em grande parte, específicas para determinadas espécies e locais. Nos casos em que estas não estão disponíveis, a biomassa é normalmente estimada usando fatores de expansão e/ou conversão de biomassa. Nesse caso, conforme demonstrado neste estudo, alguns pontos devem ser considerados na aplicação de tais fatores:

(i) Os fatores de expansão e conversão de biomassa são influenciados pela proporção dos diferentes componentes das árvores e estes se alteram ao longo do tempo e em função do meio (clima, altitude, qualidade do sítio, disponibilidade de nutrientes no solo, competição entre as árvores, etc.), logo a utilização de um fator constante em diferentes abordagens não é recomendável;

(ii) A estimativa da biomassa aérea total pela aplicação do fator de expansão calculado com base nos valores mensurados de biomassa aérea e biomassa do fuste (FEB correspondente a A3, igual a 1,3372), pode ser realizada com precisão considerando para tal, as estimativas de biomassa do fuste pelos sistemas de equações tradicionais e *stepwise*; além é claro, da massa do fuste;

(iii) O produto entre o volume do fuste e a densidade da espécie não deve ser considerado como variável correspondente à biomassa do fuste, visto que sua aplicação junto ao FEB (A3) resultou em subestimativas da biomassa aérea total. Nesse sentido, sua aplicação deve ser feita juntamente ao fator específico desenvolvido com base em tais variáveis (BCEF = 1,4678);

(iv) Para a estimativa da biomassa total pela aplicação de fatores de expansão e/ou conversão de biomassa, deve ser levado em consideração o método empregado no desenvolvimento dos referidos fatores, visto que a aplicação de variáveis incompatíveis pode levar a erros nas estimativas.

Embora o FEB calculado com base nas biomassas aérea e do fuste mensuradas (valores reais) tenha sido a abordagem com melhor desempenho na estimativa da biomassa aérea, a determinação da variável biomassa do fuste é uma tarefa de difícil realização. Nesse sentido, as abordagens que consideram os sistemas de equações alométricas apresentaram resultados interessantes, tanto do ponto de vista da precisão das estimativas quanto da sua aplicabilidade. O sistema de equações tradicionais apresentou estatísticas similares quando aplicado diretamente na estimativa da biomassa aérea total e, indiretamente, quando aplicado na estimativa da biomassa do fuste associado ao FEB. O sistema de equações *stepwise* apresentou estatísticas similares ao sistema tradicional quando aplicado indiretamente, todavia sua aplicação direta apresentou estimativas mais precisas da biomassa aérea total.

A abordagem considerando a variável volume cubado apresentou bons resultados, todavia, a mesma deve ser aplicada associando-a ao BCEF específico, sendo que o produto entre o volume do fuste e a densidade média da espécie não pode ser considerada como variável correspondente à biomassa do fuste. A abordagem correspondente à estimativa do volume do fuste não se configurou em um bom estimador da biomassa aérea total, apresentando o pior desempenho entre as abordagens avaliadas.

## 6 CONCLUSÕES

- Os sistemas de equações tradicionais e *stepwise* possibilitaram estimativas de biomassa aérea total satisfatórias, tanto pela aplicação direta do sistema quanto pela aplicação indireta, ou seja, pela estimativa da biomassa do fuste associada ao fator de expansão correspondente;
- A utilização de fatores constantes não é recomendável, visto que estes se alteram ao longo do tempo e em função do meio, devido às alterações proporcionais nos componentes das árvores;
- Para a estimativa da biomassa total pela aplicação de fatores de expansão e/ou conversão, deve ser levado em consideração o método empregado no desenvolvimento dos referidos fatores, visto que a aplicação de variáveis incompatíveis pode levar a erros nas estimativas;
- O fator de expansão calculado com base nos valores mensurados de biomassa aérea e do fuste pode ser utilizado para estimar a biomassa aérea total juntamente à massa do fuste ou até mesmo às suas estimativas;
- A abordagem considerando a variável volume cubado apresentou bons resultados, todavia, a mesma deve ser aplicada associando-a ao BCEF específico, sendo que o produto entre o volume do fuste e a densidade média da espécie não pode ser considerada como variável correspondente à biomassa do fuste;
- A estimativa do volume do fuste não se configurou em um bom estimador da biomassa aérea total, apresentando o pior desempenho entre as abordagens avaliadas.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

### i) Acúmulo de biomassa e carbono orgânico

- Os resultados mostram que indivíduos nativos de araucária acumulam uma grande quantidade de biomassa e carbono em sua estrutura. Tal fato deve subsidiar a obtenção de créditos de carbono como incentivo a conservação da espécie e dos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista.

### ii) Não aditividade dos componentes

- Em equações desenvolvidas para componentes e para o total, cujas estimativas não se equivalem, é interessante valer-se da soma dos componentes para compor a estimativa do seu todo. Isso evita a falta de aditividade.

### iii) Pesquisas futuras

- A abordagem de ajustamento simultâneo, abordada no presente trabalho, que realça importância de equações acuradas, com consistência biológica e eficiência estatística também pode ser aplicada em outras áreas da Engenharia Florestal, tais como: funções volumétricas, funções de afilamento, densidade do povoamento e análise econômica dos sortimentos da floresta.

- Neste trabalho foram avaliados diferentes modelos matemáticos para a estimativa da biomassa total e dos componentes. Entretanto, transformações dos modelos com melhor desempenho podem ser exploradas em trabalhos futuros.

- As variáveis avaliadas na modelagem da biomassa aérea e dos respectivos componentes podem ser aplicadas na modelagem da biomassa de árvores de menores classes diamétricas, podendo, nesse caso, representar melhor a variação da biomassa dos diferentes componentes em situação de maior competição, considerando que os dados utilizados no presente estudo correspondem às árvores pertencentes às classes superiores a 40 cm, sendo na maioria dos casos, árvores dominantes, cuja competição com árvores adjacentes é menor.

## REFERÊNCIAS

- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; FLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2003. 30p.
- AHMAD, S.; AHMAD, A.; NIZAMI, S. M. Assessement of Biomaass Expansion Factor of *Picea smithiana* (WALL) Boiss. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 5, n. 11, p. 1232-1239, 2014.
- ANTÓNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.; SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n.5, p. 895-906, 2007.
- BALBINOT, R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; MARCENE, E. A. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 232-237, 2009.
- BARBEIRO, L. S. S.; VIEIRA, G.; SANQUETTA, C. R. Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness (Canela-amarela). **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 833-843, 2009.
- BARTELINK, H. H. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas fir. **Forest Ecology and Management**, v. 86, p. 193-203, 1996.
- BROWN S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. **Environmental Pollution**, v. 116, n. 3, p. 363-372. 2002.
- BROWN, S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. **FAO Forestry Paper** 134, FAO, United Nations, Rome. 1997. 58p.
- CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F.; VIERA, M.; BALBINOT, R.; CASTRO, K. C. Biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 1027-1034, 2015.
- CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-289. 2010.
- CASTEDO-DORADO, F.; GÓMEZ-GACÍA, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARRIO-ANTA, M.; CRESCENTE-CAMPO, F. Aboveground stand-level biomass estimation: a comparison of two methods for major forest species in northwest Spain. **Annals of Forest Science**, v. 69, p. 735-746, 2012.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J. P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia** v. 145, p. 87-99, 2005.

COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. John Wiley & Sons, New York. 1963. 448p.

CORTE, A. P. D.; SILVA, F.; SANQUETTA, C. R. Fator de expansão de biomassa e razão de raízes - parte aérea para *Pinus* spp. plantadas no Sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 4, p. 755-768, 2012.

COUTINHO, V. M.; SANQUETTA, C. R.; SANQUETTA, M. N. I.; RODRIGUES, A. L.; CORTE, A. P. D. Equações tradicionais e simultâneas para biomassa de compartimentos aéreos de *Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v.35, n.1, p.58-75, 2017.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Global Forest Resource Assessment 2000. **FAO Forestry Paper** 140. FAO, Rome. 2001.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 62, p. 599-609, 1981.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 3, p. 81-86, 2011.

GIRI, N.; KUMAR, R.; RAWAT, L.; KUMAR, P. Development of Biomass Expansion Factor (BEF) and Estimation of Carbon Pool in *Ailanthus excelsa* Roxb Plantation. **Journal of Chemical Engineering and Process Technology**, v. 5, p. 1-4, 2014.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: Sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: agriculture, forestry and other land use. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), v.4, 2006.

JESSEN, R. J.; BLYTE JR., R. H.; KEMPTHORNE, O.; DEMING, W. E. On a population sample for Greece. **Journal of the American Statistical Association**, v. 42, p. 357-384, 1947.

JOHNSON, W. C.; SHARPE, D. M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 13, n.3, p. 372-383, 1983.

KAUPPI, P. E.; MIELIKÄINEN, K.; KUUSELA, K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971-1990. **Science**, v. 256, p. 70-74. 1992.

KHURSHID, A.; SYED, M. N. Assessing Biomass Expansion Factor of Birch Tree *Betula utilis* D. DON. **Open Journal of Forestry**, v. 4, p. 181-190, 2014.

KIM, C.; JEONG, J.; KIM, R. H.; SON, Y. M.; LEE, K. H.; KIM, J. S.; PARK, I. H. Allometric equations and biomass expansion factors of Japanese red pine on the local level. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 7, p. 283-289, 2011.

KOZAK, M. What is strong correlation? **Teaching Statistics**, v. 31, n. 3, p. 85-86, 2009.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LEHTONEN, A.; CIENCIALA, E.; TATARINOV, F.; MÄKIPÄÄ, R. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. **Annals of Forest Science**, v. 64, p. 133-140, 2007.

LEHTONEN, A.; MÄKIPÄÄ, R.; MUUKKONEN, P. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. **Forest Ecology and Management**, v. 88, p. 211-224, 2004.

LEVY, P. E.; HALE, S. E.; NICOLL, B. C. Biomass expansion factors and root : shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. **Forestry**, v. 77, n. 5, p. 421-430, 2004.

LÖWE, H.; SEUFERT, G.; RAES, F. Comparison of methods used within member states for estimating CO<sub>2</sub> emissions and sinks according to UNFCCC and EU monitoring mechanism: forest and other wooded land. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, v. 4, p. 315-319, 2000.

LUO, Y.; WANG, X.; ZHANG, X.; REN, Y.; POORTER, H. Variation in biomass expansion factors for China's forests in relation to forest type, climate, and stand development. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 6, p.589-599, 2013.

MAGALHÃES, T. M.; SEIFERT, T. Tree component biomass expansion factors and root-to-shoot ratio of Lebombo ironwood: measurement uncertainty. **Carbon Balance and Management**, v. 10, n. 9, p. 1-14, 2015.

MARZILIANO, P. A.; MENGUZZATO, G.; COLETTA, V. Evaluating carbon stock changes in forest and related uncertainty. **Sustainability**, v. 9, p. 1702 – 1713, 2017.

MELO, L. C.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MOGNON, F. Methodological alternatives in the estimate of biomass for young individuals of *Bambusa* spp. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 791-800, 2015.

MOGNON, F.; DALLAGNOL, F. S.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BARRETO, T. G. Uma década de dinâmica de fixação de carbono na biomassa arbórea em Floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 153-164, 2013.

MONSERUD, R. A.; MARSHALL, J. D. Allometric crown relations in three Northern Idaho conifer species. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 29, p. 521-535, 1999.

MONTAGU, K. D.; DUTTMER, K.; BARTON, C. V. M.; COWIE, A. L. Developing general allometric relationship for regional estimates of carbon sequestration an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. **Forest Ecology and Management**, v. 204, p. 113-127, 2005.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1853-1867, 2008.

PAJTÍK, J.; KONOPKA, B.; LUKAC, M. Individual biomass factors for beech, oak and pine in Slovakia: a comparative study in young naturally regenerated stands. **Trees**, v. 25, p. 277-288, 2011.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 865-878, 2001.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, p. 573-593, 1999.

PELLETIER, J.; KIRBY, K. R.; POTVIN, C. Significance of carbon stock uncertainties on emission reductions from deforestation and forest degradation in developing countries. **Forest Policy and Economics**, v. 24, p. 3-11, 2010.

PETERSSON, H.; HOLM, S.; STAHL, G.; ALGER, D.; FRIDMAN, J.; LEHTONEN, A.; LUNDSTRÖM, A.; MÄKIPÄÄ, R. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. **Forest Ecology and Management**, v. 270, p. 78-84, 2012.

REED, D. D.; TOMÉ, M. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. **Forest Ecology and Management**, v. 103, p. 21-32, 1998.

SANESI, G.; LAFORTEZZA, R.; COLANGELO, G.; MARZILIANO, P. A.; DAVIES, C. Root system investigation in sclerophyllous vegetation: An overview. **Italian Journal of Agronomy**, v. 8, p. 121-126, 2013.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 119-140.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. (Eds.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR/Ecoplan, 2004, p. 47-63.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; PÉLLICO NETTO, S.; SCHIKOWSKI, A. B.; AMARAL, M. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 8, p. 1099-1112, 2015.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; SILVA, F. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 6, p. 1-8, 2011.

SAS Institute Inc. SAS/STAT. User's Guide, Version 9.0. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2004.

SATOO, T.; MADGWICK, H. A. I. **Forest biomass**. The Hague: Martinus Nijhoff, 1982. 151p.

SILVEIRA, P. Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de Floresta Ombrófila Densa utilizando o método da derivação do volume comercial. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 789-800, 2010.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, R.; MAKIPAA, R.; MUUKKONEN, P.; LEHTONEN, A.; WEISS, P. Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal Forest Research**, v. 126, n. 2, p 197–207, 2006.

TEOBALDELLI, M.; SOMOGYI, Z.; MIGLIAVACCA, M.; USOLTSEV, V. A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 1004–1013, 2009.

UN-ECE/FAO. Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries), UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment. **Main Report United Nations**, New York, Geneva. 2000.

VALÉRIO, A. F.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, R. T.; SILVESTRE, R.; KOEHLER, H. S. Ajuste de modelos matemáticos para estimativa de biomassa nos distintos componentes de uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thunb.). **Ambiência**, v. 3, n. 3, p. 325-336, 2007.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 2006. 627p.



## REFERÊNCIAS GERAIS

- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; FLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2003. 30p.
- AHMAD, S.; AHMAD, A.; NIZAMI, S. M. Assessement of Biomaass Expansion Factor of *Picea smithiana* (WALL) Boiss. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 5, n. 11, p. 1232-1239, 2014.
- ALAM, K.; NIZAMI, S. Assessing biomass expansion factor of birch tree *Betula utilis* D. DON. **Open Journal of Forestry**, n. 4, p. 181-190, 2014.
- ANTÔNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.; SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n.5, p. 895-906, 2007.
- ARAÚJO, M. M.; CHAMI, L.; LONGHI, S. J.; AVILA, A. L.; BRENA, D. A. Análise de agrupamento em remanescente de Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 1-18, 2010.
- ASTARITA, L. V.; FLOH, E. I. S.; HANDRO, W. Free amino acid, protein and water content changes associated with seed development in *Araucaria angustifolia*. **Biologia Plantarum**, v. 47, n. 1, p. 53-59, 2003.
- BACKES, A. Distribuição geográfica atual da Floresta com Araucária: condicionamento climático. In: FONSECA, C. R.; SOUZA, A. F.; LEAL-ZANCHET, A. M.; DUTRA, T. L.; BACKES, A.; GANADE, G. (Eds.). **Floresta com Araucária. Ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável**. Ribeirão Preto: Editora Holos, 2009. p. 39-44.
- BALBINOT, R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; MARCENE, E. A. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 232-237, 2009.
- BANDEL, G.; GURGEL, J. T. A. Proporção do sexo em pinheiro brasileiro *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 6, p. 209-220, 1967.
- BARBEIRO, L. S. S.; VIEIRA, G.; SANQUETTA, C. R. Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness (Canela-amarela). **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 833-843, 2009.
- BARRETO, L. V.; FREITAS, A. C. S.; PAIVA, L. C. Sequestro de carbono. Centro Científico Conhecer. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, n. 7, p. 1-10. 2009.



BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M. A. (Eds.). **Nutrition of eucalyptus**. Collingwood, VIC: CISRO, 1996. p. 335-356.

BARTELINK, H. H. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas fir. **Forest Ecology and Management**, v. 86, p. 193-203, 1996.

BECKERT, S. M.; ROSOT, M. A. D.; ROSOT, N. C. Crescimento e dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktza. em fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 209-218, 2014.

BI, H.; BIRK, E.; TURNER, J.; LAMBERT, M.; JURSKIS, V. Converting stem volume to biomass with additivity, bias correction, and confidence bands for two Australian tree species. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.31, n.3, p. 298-319, 2001.

BI, H.; LONG, Y.; TURNER, J.; LEI, Y.; SNOWDON, P.; LI, Y.; HARPER, R.; ZERIHUN, A.; XIMENES, F. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 2301-2314, 2010.

BI, H.; TURNER, J.; LAMBERT, M. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. **Trees**, v. 18, p. 467-479, 2004.

BRASIL, M. A. M.; NICOLLELO, N.; VEIGA, R. A. A. Variação da densidade básica da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede em diversas idades na região de Agudos - SP. **Floresta**, Curitiba, v.11, n.1, p. 33-39, 1980.

BRASIL. Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014. Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria\\_mma\\_443\\_2014.pdf](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria_mma_443_2014.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2017.

BREUGEL, M. V.; RANSIJN, J.; CRAVEN, D.; BONGERS, F.; HALL, J. S. Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 8, p. 1648-1657, 2011.

BROWN S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. **Environmental Pollution**, v. 116, n. 3, p. 363-372. 2002.

BROWN, S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. **FAO Forestry Paper** 134, FAO, United Nations, Rome. 1997. 58p.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science**, Lawrence, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological Methods and Research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, 2004.

CALDEIRA, M. V. W.; SAIDELLES, F. L. F.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. O. Biomassa de plantio de *Acacia mearnsii* De Wild., Rio Grande do Sul, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 133- 141, 2011.

CALDEIRA, M. V. W.; SOARES, R. V.; WATZLAWICK, L. F. Estimativa de biomassa em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista Montana – General Carneiro – PR. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 1, n. 3, p. 291-310, 2004.

CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F.; VIERA, M.; BALBINOT, R.; CASTRO, K. C. Biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 1027-1034, 2015.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; NETO, R. M. R.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, E. M. Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* De Wild., Procedência Batemans Bay – Austrália. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 79-91, 2001.

CANGA, E.; DIEGUEZ-ARANDA, I.; AFIF-KHOURI, E.; CAMARA-OBREGON, A. Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. **Forest Systems**. v. 22, n. 3, p. 408-415, 2013.

CARVALHO, B. G. **Diferenciação sexual de *Araucaria angustifolia* por RMN HR-MAS e análise multivariada**. 59 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Goiás – UFGO, Goiânia, 2012.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-289. 2010.

CARVALHO, J. P.; PARRESOL, B. R. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 269-276, 2003.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ/Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 640p.

CASTEDO-DORADO, F.; GÓMEZ-GACÍA, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARRIO-ANTA, M.; CRESCENTE-CAMPO, F. Aboveground stand-level biomass estimation: a comparison of two methods for major forest species in northwest Spain. **Annals of Forest Science**, v. 69, p. 735-746, 2012.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts

and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J. P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia** v. 145, p. 87-99, 2005.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIFDUMAYO, E.; COLGAN, M. S.; DELITTI, W. B. C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P. M.; GOODMAN, R. C.; HENRY, M.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W. A.; MULLER-LANDAU, H.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B. W.; NGOMANDA, A.; NOGUERIA, E. M.; ORTIZMALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLONTON, P.; RYAN, C. M.; SALDARRIAGA, J. G.; VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3177-3190, 2014.

CHIYENDA, S. S.; KOZAK, A. Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, p. 441-446, 1984.

COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. John Wiley & Sons, New York. 1963. 448p.

CORREIA, A.; FAIAS, S.; TOMÉ, M.; EVANGELISTA, M.; FREIRE, J.; CARVALHO, P. O. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de Pinheiro Manso no Sul de Portugal. **Silva Lusitana**, Oeiras, v.16, n.2, p.197-205, 2008.

CORTE, A. P. D.; SILVA, F.; SANQUETTA, C. R. Fator de expansão de biomassa e razão de raízes - parte aérea para *Pinus* spp. plantadas no Sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 4, p. 755-768, 2012.

COUTINHO, V. M.; SANQUETTA, C. R.; SANQUETTA, M. N. I.; RODRIGUES, A. L.; CORTE, A. P. D. Equações tradicionais e simultâneas para biomassa de compartimentos aéreos de *Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v.35, n.1, p.58-75, 2017.

CROMER, R. N.; RAUPACH, M.; CLARKE, A. R. P.; CAMERON, J. N. Eucalyptus plantations in Australia. The potential for intensive production. **Appita**, v. 29, p. 165-173, 1975.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético**. Viçosa: Editora UFV, 4 ed., 2012. 514p.

CUNIA, T. On tree biomass tables and regression: some statistical comments. In: FRAYERN, W. E. (ed). Forest resource inventories. **Workshop proceedings**. 2. Colorado, Colorado State University, 1979. p. 629-642.

CUNIA, T.; BRIGGS, R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, p. 376-384, 1984.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DAWKINS, H. C. **The management of natural tropical high forest with special reference to Uganda**. Oxford: University of Oxford, Imperial Forestry Institute; 1958.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, Washington, v. 263, p. 185-190, 1994.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. NOAA/ESRL. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 8 ago. 2017.

DUARTE, L. S.; HARTZ, S. M.; PILLAR, V. de P. A dinâmica de nucleação dos pinhais sobre os campos no planalto sul-riograndense. In: FONSECA, C. R.; SOUZA, A. F.; LEAL-ZANCHET, A. M.; DUTRA, T.; BACKES, A.; GANADO, G. (Eds.). **Floresta com Araucária. Ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável**. Ribeirão Preto: Editora Holos, 2009. p. 75-84.

FANG, J.; CHEN, A.; PENG, C.; ZHAO, S.; CI, L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. **Science**, v. 292, p. 2320-2322, 2001.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Global Forest Resource Assessment 2000. **FAO Forestry Paper** 140. FAO, Rome. 2001.

FARIA, R. A. V. B. **Estoque de carbono e atributos florísticos e edáficos de ecossistemas florestais em processo de restauração**. 167 f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras. 2012.

FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gas contributions from deforestation in Brazilian Amazonia. In: LEVINE, J. S. (Ed.). **Global Biomass Burning: Atmospheric Climatic and Biospheric Implications**. Boston: MIT, p. 92-105, 1991.

FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 59-87, 1997.

FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 763-776. 2010.

FIGUEIREDO FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; KOHLER, S. V.; BECKER, M.; BRANDES, D. Efeito da idade no afilamento e sortimento em povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 50-59, 2015.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, Washington, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 62, p. 599-609, 1981.

FRANCO, A. C.; DUARTE, H. M.; GEBLER, A.; MATTOS, E. A.; NAHM, M.; RENNENBERG, H.; RIBEIRO, K. T.; SCARANO, F. R.; LÜTTGE, U. In situ measurements of carbon and nitrogen distribution and composition, photochemical efficiency and stable isotope ratios in *Araucaria angustifolia*. **Trees**, v. 19, n. 4, p.422-430, 2005.

GALLANT, A. R. **Nonlinear statistical models**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 3, p. 81-86, 2011.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 3, p. 81-86, 2011.

GIRI, N.; KUMAR, R.; RAWAT, L.; KUMAR, P. Development of Biomass Expansion Factor (BEF) and Estimation of Carbon Pool in *Ailanthus excelsa* Roxb Plantation. **Journal of Chemical Engineering and Process Technology**, v. 5, p. 1-4, 2014.

GOICOA, T.; MILITINO, A. F.; UGARTE, M. D. Modelling aboveground tree biomass while achieving the additivity property. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 18, p. 367-384, 2011.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 13-64.

GRIFFITH, M. M. The structure and growth of the shoot apex in *Araucaria*. **American Journal of Botany**, v. 39, n. 4, p. 253-263, 1952.

GROSFELD, J.; BARTHÉLÉMY, D.; BRION, C. Architectural variations of *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch (Araucariaceae) in its natural habitat. In: KURMANN, M. H.; HEMSLEY A. R. (Eds.). **The Evolution of Plant Architecture**. Londres: Royal Botanic Gardens, Kew, 1999. p. 109-122.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: Sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

HENRY, M.; BESNARD, A.; ASANTE, W. A.; ESHUN, J.; ADU-BREDU, S.; VALENTINI, R.; BERNOUX, M.; SAINT-ANDRÉ, L. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 8, p. 1375-1388, 2010.

HERCOWITZ, M.; MATTOS, L.; SOUZA, R. P. Estudos de casos sobre serviços ambientais. In: MATTOS, L.; HERCOWITZ, M. (Ed.). **Economia do meio ambiente e serviços ambientais**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 163-279.

HIGA, A. R.; KAGEYAMA, P. Y.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *P. elliotii* var. *elliotii* e *P. taeda*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n.7, p.79-91, 1973.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD/FBDS, 1994. p.125-145.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. P.; ROCHA, R. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 153-165, 1998.

HOUGHTON, R. A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. **Global Change Biology**, v. 11, n. 6, p. 945-958, 2005.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO<sub>2</sub> – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro, 1994. p. 38–76.



HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L. NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, n. 403, p. 301-304, 2000.

HUECK, K. Distribuição e habitat natural do Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*). **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo**, v. 10, p. 1-24, 1953.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest Mensuration**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1982.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: 1992. 92 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n.1).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=410773>>. Acesso em 22 ago. 2017.

IBGE. **Mapa de aplicação da Lei nº 11.428 de 2006 que dispõem sobre a utilização e proteção do Bioma Mata Atlântica e de outras providências**. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009.

IMANÃ-ENCINAS, J.; PAULA, J. E.; CONCEIÇÃO, C. A. Florística, volume e biomassa lenhosa de um fragmento de Mata Atlântica no município de Santa Maria de Jetibá, Espírito Santo. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 565-576, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), v.4, 2006.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance for land-use, land-use change and forestry**. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. 2003. 675p.

JACOBS, M. W.; CUNIA, T. Use of dummy variables to harmonize tree biomass tables. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 10, p. 483-490, 1980.

JESSEN, R. J.; BLYTE JR., R. H.; KEMPTHORNE, O.; DEMING, W. E. On a population sample for Greece. **Journal of the American Statistical Association**, v. 42, p. 357-384, 1947.

JOHNSON, W. C.; SHARPE, D. M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 13, n.3, p. 372-383, 1983.

KADEBA, O. Growth and nutrient accumulation by *Pinus caribaea* on three savanna sites in northern Nigeria. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 49, p. 139-147, 1994.

KAUPPI, P. E.; MIELIKÄINEN, K.; KUUSELA, K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971-1990. **Science**, v. 256, p. 70-74. 1992.

KERSTEN, R. A.; BORGIO, M.; GALVÃO, F. Floresta Ombrófila Mista: aspectos fitogeográficos, ecológicos e métodos de estudo. In: EISENLOHR, P. V.; MELO, M. M. R. F.; ANDRADE, L. A.; MEIRA NETO, A. A. (Eds.). **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de caso**. Viçosa: UFV, 2015. p. 156-182.

KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. V.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, n. 1-3, p. 199-209, 2001.

KHURSHID, A.; SYED, M. N. Assessing Biomass Expansion Factor of Birch Tree *Betula utilis* D. DON. **Open Journal of Forestry**, v. 4, p. 181-190, 2014.

KIM, C.; JEONG, J.; KIM, R. H.; SON, Y. M.; LEE, K. H.; KIM, J. S.; PARK, I. H. Allometric equations and biomass expansion factors of Japanese red pine on the local level. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 7, p. 283-289, 2011.

KINDERMANN, E. G.; MCCALLUM, I.; FRITZ, S.; OBERSTEINER, M. A Global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. **Silva Fennica**, v. 42, n. 2, p. 387-396, 2008.

KLAUBERG, C.; PALUDO, G. F.; BORTOLUZZI, R. L. C.; MANTOVANI, A. Florística e estrutura de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Planalto Catarinense. **Biotemas**, v. 23, n. 1, p. 35-47, 2010.

KLEIN, D. R.; HESS, A. F.; KREFTA, S. M.; FILHO, M. D. H. V.; CIARNOSCKI, D.; COSTA, E. A. Relações morfométricas para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 4, p. 501-512, 2017.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 251-264.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; VALÉRIO, A. F. Fontes de erros nas estimativas de biomassa e carbono fixado na Floresta Ombrófila Mista. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 69-77, 2005.



KOSCINSKI, M. **O pinheiro brasileiro na Silvicultura Paulista**. Secretaria da Agricultura: Diretoria de Publicidade Agrícola, São Paulo. 1934. 56p.

KOZAK, A. Methods of ensuring additivity of biomass components by regression analysis. **The Forestry Chronicle**, v. 46, n. 5, p. 402-404, 1970.

KOZAK, M. What is strong correlation? **Teaching Statistics**, v. 31, n. 3, p. 85-86, 2009.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiological of woody**. 2 ed. San Diego: Academic, 1996. 432p.

KRALICEK, K.; HUY, B.; POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H.; SALAS, C. Simultaneous estimation of above- and below-ground biomass in tropical forests of Viet Nam. **Forest Ecology and Management**, v. 390, p. 147–156. 2017.

KURZ, W. A.; DYMOND, C. C.; STINSON, G.; RAMPLEY, G. J.; NEILSON, E. T.; CARROL, A. L.; EBATA, T.; SAFRANYIK, L. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. **Nature**, n. 452, p. 987-990, 2008.

LADEIRA, B. C.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos em uma sequencia de idade. **Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 69-78, 2001.

LAMBERT, M. C.; UNG, C. H.; RAULIER, F. Canadian national tree aboveground biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 1996-2018, 2005.

LAMPRECHT H. **Silvicultura nos trópicos**. Eschborn: GTZ; 1990. 343p.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LECO. **C-144 Carbon Determinator**. Specification Sheet 209-134-003. LECO Corporation, 2008. 2p.

LEHTONEN, A.; CIENCIALA, E.; TATARINOV, F.; MÄKIPÄÄ, R. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. **Annals of Forest Science**, v. 64, p. 133–140, 2007.

LEHTONEN, A.; MÄKIPÄÄ, R.; MUUKKONEN, P. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. **Forest Ecology and Management**, v. 88, p. 211–224, 2004.

LEVY, P. E.; HALE, S. E.; NICOLL, B. C. Biomass expansion factors and root : shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. **Forestry**, v. 77, n. 5, p. 421-430, 2004.

LIMA, A. J. N.; SUWA, R.; RIBEIRO, G. H. P. M.; KAJIMOTO, T.; SANTOS, J.; SILVA, R. P.; SOUZA, C. A. S.; BARROS, P. C.; NOGUCHI, H.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 277, p. 163-172, 2012.

LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, A. K.; BARBATI, A.; GARCIA GONZALO, J.; SEIDI, R.; DELZON, S. CORONA, P.; KOLSTRÖM, M.; LEXER, M. J.; MARCHETTI, M. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 698-709, 2010.

LOURES, B. T. R. R.; RIBEIRO, R. P.; VARGAS, L.; MOREIRA, H. L. M.; SUSSEL, F. R.; POVH, J. A.; CAVICHIOLO, F. Manejo alimentar de alevinos de tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus* (L.), associado às variáveis físicas, químicas e biológicas do ambiente. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 4, p. 877-883, 2001.

LÖWE, H.; SEUFERT, G.; RAES, F. Comparison of methods used within member states for estimating CO<sub>2</sub> emissions and sinks according to UNFCCC and EU monitoring mechanism: forest and other wooded land. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, v. 4, p. 315-319, 2000.

LUGO, A. E.; BROWN, S.; CHAPMAN, J. An analytical review of production rates and stem wood biomass of tropical forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 23, n. 2-3, p. 179-200, 1988.

LUO, Y.; WANG, X.; ZHANG, X.; REN, Y.; POORTER, H. Variation in biomass expansion factors for China's forests in relation to forest type, climate, and stand development. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 6, p. 589-599, 2013.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Livraria José Olympio. Curitiba. 1968. 442p.

MACHADO, S. A.; ZAMIN, N. T.; NASCIMENTO, R. G. M.; SANTOS, A. A. P. Efeito de variáveis climáticas no crescimento mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em fase juvenil. **Floresta e Ambiente**, n. 21, v. 2, p. 170-181, 2014.

MAGALHÃES, T. M.; SEIFERT, T. Tree component biomass expansion factors and root-to-shoot ratio of Lebombo ironwood: measurement uncertainty. **Carbon Balance and Management**, v. 10, n. 9, p. 1-14, 2015.

MANDAL, R. A.; YADAV, B. K. V.; YADAV, K. K.; DUTTA, I. C.; HAQUE, S. M. Development of allometric equation for biomass estimation of *Eucalyptus camaldulensis*: a study from Sagarnath Forest, Nepal. **International Journal of Biodiversity and Ecosystems**, n. 1, v. 1, p. 1-7, 2013.

MARTIN, T. A.; JOKELA, E. J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 39-58, 2004.

MARZILIANO, P. A.; MENGUZZATO, G.; COLETTA, V. Evaluating carbon stock changes in forest and related uncertainty. **Sustainability**, v. 9, p. 1702 – 1713, 2017.

MATOS, F. D. A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa da Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme na Amazônia Central com o Satélite Ikonos II. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 157-171, 2008.

MATTOS, J. R. Araucariaceae do Rio Grande do Sul. **Roessléria**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 17-37, 1985.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Árvore**, v.32, n.1, p.101-111, 2008.

MELO, L. C.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MOGNON, F. Methodological alternatives in the estimate of biomass for young individuals of *Bambusa* spp. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 791-800, 2015.

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.; CANGA, E.; BARRIO-ANTA, M.; MAJADA, J.; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P. A three level system for estimating the biomass of *Castanea sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 291, p. 417-426, 2013.

MOGNON, F.; DALLAGNOL, F. S.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BARRETO, T. G. Uma década de dinâmica de fixação de carbono na biomassa arbórea em Floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 153-164, 2013.

MONSERUD, R. A.; MARSHALL, J. D. Allometric crown relations in three Northern Idaho conifer species. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 29, p. 521-535, 1999.

MONTAGU, K. D.; DUTTMER, K.; BARTON, C. V. M.; COWIE, A. L. Developing general allometric relationship for regional estimates of carbon sequestration an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. **Forest Ecology and Management**, v. 204, p. 113-127, 2005.

MOTULSKY, H.; CHRISTOPOULOS, A. **Fitting models to biological data using linear e nonlinear regression: a pratical guide to curve fitting**. San Diego: GraphPad Software, 2003. 351p.

MURAKAMI, M. H. **Identificação de marcador molecular ligado à expressão sexual em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 63 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba. 2002.

NÁVAR, J. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. **Annals of Forest Science**, v. 66, p. 1-21, 2009.

NÁVAR, J.; MÉNDEZ, E.; DALE, V. Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. **Annals of Forest Science**, v. 59, p. 813-821, 2002.

NÁVAR, J.; MÉNDEZ, E.; NÁJERA, A.; GRACIANO, J.; DALE, V.; PARRESOL, B. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 59, n. 4, p. 657-674, 2004.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 11, p. 1853-1867, 2008.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1853-1867, 2008.

OTTO, H. J. **Waldökologie**. Stuttgart, Ulmer, 1994. 391p.

PAJTÍK, J.; KONOPKA, B.; LUKAC, M. Individual biomass factors for beech, oak and pine in Slovakia: a comparative study in young naturally regenerated stands. **Trees**, v. 25, p. 277-288, 2011.

PARDÉ, J. **Forest biomass**. In: Forestry Abstract Review Article. França: Station de Silviculture et de Production, Centre National de Recherches Forestieres, vol. 41. p. 349-352. 1980.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 865-878, 2001.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, p. 573-593, 1999.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Colombo: Embrapa Florestas; Brasília: Embrapa, 2015. 370p.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (eds.). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 p. 2014a.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. ASSAD, E. D.; MAGALHÃES, A. R. (eds.). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 p. 2014b.

PELLETIER, J.; KIRBY, K. R.; POTVIN, C. Significance of carbon stock uncertainties on emission reductions from deforestation and forest degradation in developing countries. **Forest Policy and Economics**, v. 24, p. 3-11, 2010.

PETERSSON, H.; HOLM, S.; STAHL, G.; ALGER, D.; FRIDMAN, J.; LEHTONEN, A.; LUNDSTRÖM, A.; MÄKIPÄÄ, R. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. **Forest Ecology and Management**, v. 270, p. 78-84, 2012.

POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H. Methods for estimating aboveground biomass and its components for Douglas-fir and lodgepole pine trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, p. 77-87, 2016.

REED, D. D.; GREEN, E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 15, p. 1184-1187, 1985.

REED, D. D.; TOMÉ, M. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. **Forest Ecology and Management**, v. 103, p. 21-32, 1998.

REITZ, R.; KLEIN, R. M. **Araucariáceas**. In: Flora Ilustrada Catarinense. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues. 1966. p. 1-62.

RODE, R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; GALVÃO, F.; MACHADO, S. A. Estrutura horizontal da comunidade arbórea sob um povoamento com *Araucaria angustifolia* e uma Floresta Ombrófila Mista. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 347-361, 2010.

RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y. S.; HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná. **Ciência e Ambiente**, v. 24, n. 1, p. 75-92, 2002.

RUIZ-PEINALDO, R. G.; MONTERO, G.; DEL RIO, M. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. **Forest Systems**, v. 21, p. 42-52, 2012.

SALATI, E. Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, p. 15-37, 1994.

SALOMÃO, R. P.; NEPSTAD, D. C.; VIEIRA, I. C. G. Como a biomassa de florestas tropicais influi no efeito estufa? **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 21, n. 123, p. 38-47, 1996.

SANESI, G.; LAFORTEZZA, R.; COLANGELO, G.; MARZILIANO, P. A.; DAVIES, C. Root system investigation in sclerophyllous vegetation: An overview. **Italian Journal of Agronomy**, v. 8, p. 121-126, 2013.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF, 2002. p. 119-140.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. (Eds.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR/Ecoplan, 2004, p. 47-63.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; PÉLLICO NETTO, S.; SCHIKOWSKI, A. B.; AMARAL, M. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 8, p. 1099-1112, 2015.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; SILVA, F. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 6, p. 1-8, 2011.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; EISFELD, R. L. Crescimento, mortalidade e recrutamento em duas florestas de Araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.) no estado do Paraná, Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 101-112, 2003.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 1-8, 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 33-40. 2003.

SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. On the use of data mining for estimating carbon storage in the trees. **Carbon Balance Management**, v. 8, n. 6, p. 1-9, 2013.



SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Comparison of data mining and allometric model in estimation of tree biomass. **BMC Bioinformatics**, v. 16, n. 1, p. 1-9, 2015.

SANTOS, J. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da Floresta Tropical Úmida de Terra-Firme da Amazônia brasileira**. 121 f. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 1996.

SANTOS, R. F.; VIVAN, J. L. **Pagamento por serviços ecossistêmicos em perspectiva comparada**: recomendações para tomada de decisão. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 180p. (Diálogos Setoriais União Europeia-Brasil).

SAS Institute Inc. SAS/STAT. User's Guide, Version 9.0. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2004.

SATOO, T.; MADGWICK, H. A. I. **Forest biomass**. The Hague: Martinus Nijhoff, 1982. 151p.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. **Ambiência**, v. 4, n. 3, p. 529-549, 2008.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul - RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 321-332, 2013.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G.; VIERA, M. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 53-62, 2011.

SEDJO, R. A. Temperature Forest ecosystem in the global carbon cycle. **Ambio**, Stockholm, v. 21, N. 4, p. 274-277, 1992.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2-8, 2005.

SHYMOIA, C. Contribuição ao estudo do ciclo biológico da *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Experientiae**, v. 2, n. 2, p. 519-540, 1962.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. P. C.; PICCOLO, M. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.

SILVA, F. A.; FORTES, F. O.; RIVA, D.; SCHORR, L. P. B. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na Região Norte do Rio Grande do Sul. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.4, n.3, p.143-146, 2017.

SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; BOGNOLA, I. A. Recomendação de solos para *Araucaria angustifolia* com base nas suas propriedades físicas e químicas. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 43, p. 61-74, 2001.

SILVA, R. F.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, L. M.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 979-992, 2008.

SILVEIRA, P. Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de Floresta Ombrófila Densa utilizando o método da derivação do volume comercial. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 789-800, 2010.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.1, p.185-206, 2008.

SOARES, C. P. B. NETO, F. P.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G. Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, v. 20, n. 2, p. 179-189, 1996.

SOARES, C. P. B., LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711- 718, 2005.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

SOCHER, L. G.; RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F. Biomassa aérea de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial no município de Araucária (PR). **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 245-252, 2008.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, R.; MAKIPAA, R.; MUUKKONEN, P.; LEHTONEN, A.; WEISS, P. Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal Forest Research**, v. 126, n. 2, p 197–207, 2006.

SOUZA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/LANDSAT para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de



*Pinus* spp. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., Santos. **Anais...** Santos: INPE, 1998. 1 CD-ROM.

SPURR, S. H.; BARNES, B. V. **Ecologia Forestal**, México. 1986. 690p.

SRIVASTAVA, V. K.; GILES, D. E. A. **Seemingly Unrelated Regression Equations Models**. Estimation and Inference. New York: Marcel Decker, 1987. 374p.

TEOBALDELLI, M.; SOMOGYI, Z.; MIGLIAVACCA, M.; USOLTSEV, V. A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 1004–1013, 2009.

TIMONI, J. L.; VEIGA, R. A. A.; PINHEIRO, G. S. Determinação de equações para quantificação da biomassa da copa de árvores de *Eucalyptus saligna* Smith aos 22 anos. **Revista do Instituto Florestal**, v. 9, n. 1, p. 61-69, 1997.

UN-ECE/FAO. Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries), UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment. **Main Report United Nations**, New York, Geneva. 2000.

VALÉRIO, A. F.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, R. T.; SILVESTRE, R.; KOEHLER, H. S. Ajuste de modelos matemáticos para estimativa de biomassa nos distintos componentes de uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thunb.). **Ambiência**, v. 3, n. 3, p. 325-336, 2007.

VEILLON, J.M. Architecture des espèces néo-calédoniennes du genre Araucaria. **Candollea**, n. 35, v. 2, p. 609-640, 1980.

VIANA, H.; MARQUES, C. P.; FONSECA, T. Predição da biomassa aérea da *Pinus pinaster* Aiton por um sistema de equações aditivas integrado no simulador open source modispinaster. **Silva Lusitana**. v. 21. p. 1-9, 2013.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Biomassa e macronutrientes de uma Floresta Estacional Decidua em Itaara-RS, Brasil. **Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 1, 99-105, 2013.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma Floresta Estacional Decidua em Itaara, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.4, p.419-425, 2006.

WATSON, C. **Forest carbon accounting**: overview and principles. London: UNDP/UNEP, 2009. 39p.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; GODINHO, T. O.; BALBINOT, R.; TRAUTENMULLER, J. W. Aboveground stock of biomass and organic carbon in stands of *Pinus taeda* L. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 509-515, 2013.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. O.; BALBINOT, R. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana, Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n.95, p. 353-362, 2012.

WATZLAWICK, L. F.; EBLING, A. A.; RODRIGUES, A. L.; VERES, Q. J. I.; LIMA, A. M. Variação nos teores de carbono orgânico em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 248-258, 2011.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de Carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Eds.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba: FUPF, 2002. p. 153-190.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Kuntze no Sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p. 63-68, 2003.

WEBER, K. S.; SANQUETTA, C. R.; MELLO, A. A.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R. Variação nos teores de carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 22, n. 76, p. 23-28, 2003.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 2006. 627p.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER, J. C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 336p.

YAMAGUCHI, L. F.; KATO, M. J. Diurnal and seasonal changes in biflavonoids biosynthesis in *Araucaria angustifolia* needles. **Global Journal of Biochemistry**, n. 3, p. 1-7, 2012.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. **Journal of the American Statistical Association**, v. 57, n. 298, p. 348-368, 1962.

ZHAO, D.; KANE, M.; TESKEY, R.; MARKEWITZ, D. Modeling aboveground biomass components and volume-to-weight conversion ratios for loblolly pine trees. **Forest Science**, v. 62, p. 463-473, 2016.

APÊNDICE 1 – DISPERSÃO DE RESÍDUOS DOS MODELOS TRADICIONAIS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA DOS COMPONENTES E BIOMASSA  
ÁREA TOTAL DE *Araucaria angustifolia*.

